

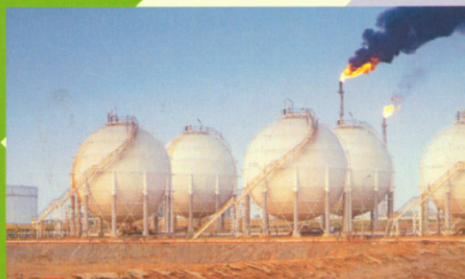


ТОЛЬЯТТИНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

М.В. Кравцова
Н.С. Потчибий

НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК

Учебно-методическое пособие



Тольятти
Издательство ТГУ
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Автомеханический институт
Кафедра «Управление промышленной
и экологической безопасностью»

М.В. Кравцова, Н.С. Потчибий

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Учебно-методическое пособие

Тольятти
Издательство ТГУ
2011

УДК 62-192
ББК 30.14
К771

Рецензенты:

д.т.н., профессор Самарского государственного
технического университета *Г.Н. Яговкин*;
к.т.н., доцент Тольяттинского государственного
университета *И.В. Кузьмич*.

К771 Кравцова, М.В. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб.-метод. пособие / М.В. Кравцова, Н.С. Потчибий – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2011. – 236 с. : обл.

Учебно-методическое пособие предназначено для изучения дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск». Изложены основные понятия, определения и критерии, используемые в теории надежности. Рассмотрены общие методы расчета надежности технических систем различного назначения как нерезервированные, так и резервированные.

В пособии представлены требования к изучению дисциплины, методические указания по выполнению лабораторных работ и практических заданий по дисциплине, контрольные и экзаменационные вопросы.

Адресовано студентам направлений подготовки 656500 «Безопасность жизнедеятельности» и 280700 «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

УДК 62-192
ББК 30.14

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

1. Цели и задачи дисциплины

«Надежность технических систем и техногенный риск» – специальная учебная дисциплина, которая изучает закономерности изменения показателей работоспособности объектов с течением времени, а также физическую природу отказов и на этом основании разрабатывает общие методы, обеспечивающие с наименьшими затратами времени и средств необходимую долговечность и безотказность объектов. Теория надежности базируется на таких дисциплинах, как «Теория вероятности», «Математическая статистика», «Теория массового обслуживания», «Теория случайных процессов», «Сопrotивление материалов», «Детали машин (общие сведения по расчету и конструированию)», «Технология конструкционных материалов и материаловедение».

Целью изучения дисциплины является формирование специалиста, умеющего прогнозировать, оценивать, устранять причины и смягчать последствия нештатного взаимодействия компонентов в системах типа «человек – машина – среда», а также способного создавать современную технику.

Основная задача дисциплины – приобретение теоретических знаний в области надежности и формирование практических навыков, необходимых:

- для разработки физических и математических моделей системы «человек – машина – среда»;
- проведения анализа показателей надежности систем «человек – машина – среда»;
- анализа опасностей и рисков, связанных с созданием и эксплуатацией современной техники и технологий;
- прогнозирования и оценки технического состояния систем.

В дисциплине рассматриваются: анализ надежности и техногенного риска систем типа «человек – машина – среда»; основные определения теории надежности; математический аппарат анализа надежности и техногенного риска; множества в применении к анализу опасностей; элементы теории вероятностей для исследования надежности и прогнозирования техногенного риска; элементы системы и системного анализа; функциональные системы управления опасностями; показатели безотказности, качественные и количественные характеристики надежности; понятие

о старении и восстановлении машин и их составных частей; факторы, влияющие на надежность изделий; показатели безотказности; методы статистического анализа состояния изделий; риск и безопасность; структура управления проблемой надежности технических систем и техногенного риска.

Надежность и техногенный риск тесно взаимосвязаны: повышение надежности уменьшает техногенный риск, но требует дополнительных материальных затрат; при низкой надежности стоимость конструкций и сооружений, как правило, меньше, но потребуются больше затрат на ликвидацию последствий аварий и катастроф. Оптимальное решение этой проблемы посильно только инженеру, хорошо знающему основные положения теории надежности в природопользовании. В соответствии с изложенным, преподавание дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск» имеет целью вооружить будущих инженеров знаниями основных положений теории надежности технических систем и сооружений и умением оценивать надежность и техногенный риск строящихся и модернизирующихся технических систем и сооружений.

Рабочая программа по курсу составлена на основе примерной рабочей программы, рекомендованной Министерством образования РФ для направления подготовки дипломированных специалистов 656500 «Безопасность жизнедеятельности» по специальности «Безопасность технологических процессов и производств».

2. Структура и объем дисциплины Очная форма обучения

№ семестра	Количество недель в семестре	Количество часов по плану						Количество часов в неделю						Всего часов сам. работы студентов	Количество индивид. заданий	Форма итоговой аттестации	
		Лекции		Лаб. занятия		Практ. занятия		Курсовые проекты (работы)		Лекции	Лаб. занятия	Практ. занятия	Курсовые проекты (работы)				
		Всего	Лекции	Лаб. занятия	Практ. занятия	Курсовые проекты (работы)	Всего	Лекции	Лаб. занятия								Практ. занятия
6	16	32	16	16	—	—	—	—	—	2	1	1	—	—	10	—	Зачет
7	18	36	18	—	18	+	+	+	+	2	1	—	+	+	24	—	Экзамен
Всего	*	68	34	16	18	+	+	+	+	*	*	*	*	*	34	*	*

Очно-заочная форма обучения

№ семестра	Количество недель в семестре	Количество часов по плану						Количество часов в неделю						Всего часов сам. работы студентов	Количество индивид. заданий	Форма итоговой аттестации	
		Лекции		Лаб. занятия		Практ. занятия		Курсовые проекты (работы)		Всего	Лекции	Лаб. занятия	Практ. занятия				Курсовые проекты (работы)
		Всего	Лекции	Лаб. занятия	Практ. занятия	Курсовые проекты (работы)	Всего	Лекции	Лаб. занятия								
Всего	*	—	—	—	—	—	—	—	—	*	*	*	*	*	73	—	Зачет
															73	*	*

Заочная (сокращенная) форма обучения

№ семестра	Количество недель в семестре	Количество часов по плану						Количество часов в неделю						Всего часов сам. работы студентов	Количество индивид. заданий	Форма итоговой аттестации	
		Лекции		Лаб. занятия		Практ. занятия		Курсовые проекты (работы)		Всего	Лекции	Лаб. занятия	Практ. занятия				Курсовые проекты (работы)
		Всего	Лекции	Лаб. занятия	Практ. занятия	Курсовые проекты (работы)	Всего	Лекции	Лаб. занятия								
4 курс	17	16	6	10	—	+	+	+	+	—	—	—	+	—	—	—	Экзамен
Всего	*	16	6	10	—	+	+	+	+	*	*	*	*	*		*	*

3. Содержание дисциплины

Наименование разделов, тем, краткое содержание тем	Аудиторные часы					
	Лекции		Практи- ческие		Лабора- торные	
	оч- ная	заоч- ная	оч- ная	заоч- ная	оч- ная	заоч- ная
1	2	3	4	5	6	7
Введение Проблема анализа надежности и техногенного риска систем типа «человек – машина – среда». Ущерб, причиняемый техногенными и природными катастрофами. Задачи, возникающие перед специалистами рассматриваемого направления	2	0,5	–	–	–	–
Раздел 1 Математический аппарат анализа надежности и техногенного риска						
1.1. Применение аппарата алгебры логики для анализа надежности и риска. Высказывания и события. Законы алгебры логики. Карты Карно	2	–	–	–	–	–
1.2. Множества в применении к анализу опасностей. Простейшие операции над подмножествами и их представление. Оценка нечеткости. Примеры функций принадлежности	2	–	–	–	–	–
1.3. Элементы теории вероятностей для исследования надежности и прогнозирования техногенного риска. Вероятность как математическое понятие. Сравнение двух подходов. Способы генерирования полной группы событий	2	–	–	–	2	–
Раздел 2 Системный подход к анализу надежности и техногенного риска						
2.1. Система. Сложная и большая системы. Структура системы. Состояние системы. Вероятностная система. Система моделей	2		–		2	

1	2	3	4	5	6	7
2.2. Система «человек – машина – среда» (СЧМС). Система управления опасностями. Определение СЧМС. Компоненты. Иерархия. Связь с проблемой безопасности. Информационные системы. Функциональные системы управления опасностями	2		–		4	
Раздел 3 Основные понятия и показатели надежности машин и технических систем						
3.1. Показатели надежности элементов. Единичные показатели надежности: показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности. Вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа; особенности их применения	2		–		4	
3.2. Основные понятия теории надежности объектов с восстановлением. Показатели безотказности, ремонтируемости, долговечности. Параметр потока отказов. Комплексные показатели надежности: коэффициент готовности, коэффициент технического использования. Статистическая оценка законов распределения в задачах надежности	2		–		4	
3.3. Оптимальное управление эксплуатационными процессами. Влияние обслуживания на надежность технической системы	2					
3.4. Статистическое моделирование и решение задач эксплуатации сложных систем. Сущность и обоснование метода статистического моделирования. Разыгрывание случайных величин	2		2			

1	2	3	4	5	6	7
Раздел 4 Техногенный риск и его анализ						
4.1. Общие понятия в связи с риском. Риск, связанный с техникой. Индивидуальный риск, коллективный риск. Современные аспекты риска. Статистические данные по риску	2		2			
4.2. Риск и безопасность. Условие безопасности. Подход к анализу риска при наличии опасных факторов. Подход к анализу риска при наличии вредных факторов. Теории и модели происхождения и развития несчастных случаев, аварий, катастроф. Современные теории и модели	2		3			
4.3. Методы качественного и количественного анализа надежности и риска. Методы качественного анализа надежности и риска СЧМС. Алгоритмы анализа. Методы количественного анализа надежности и риска	2		4			
4.4. Основные дискретные и непрерывные распределения. Основные дискретные и непрерывные распределения и их применение к задачам определения надежности и риска СЧМС	2					
4.5. Сложные системы, их надежность и опасность. Основные типы структур сложных систем с точки зрения надежности и опасности. Особенности составления структурной схемы систем. Резервирование, классификация. ЧП. Оптимальные модели эксплуатации систем с резервированием. Алгоритм анализа более сложных систем	2		4			
4.6. Оценка и расчет риска. Основные формулы и соотношения. Применение нечетких множеств. Примеры расчетов	2		2			

1	2	3	4	5	6	7
Раздел 5 Организационные механизмы и структура управления проблемой надежности технических систем и техногенного риска						
Основы государственной и международной политики применительно к этой сфере, комбинированная защита сложных технических систем	2					
Всего часов	34		18		16	

4. Содержание практикума

Цель практикума – научиться обрабатывать статистические данные испытаний на надежность для получения основных характеристик (показателей) надежности, закона распределения наработки на отказ или ресурса машин, их узлов, деталей и соединений.

На практических занятиях выполняются следующие задания:

- обработка простого статистического ряда (исходных данных), разбивка его на разряды, определение статистической вероятности отказа и безотказной работы, статистической интенсивности отказов по разрядам;
- построение соответствующих статистических функций и их анализ;
- выбор предполагаемого теоретического закона распределения;
- определение числовых характеристик и параметров предполагаемого закона распределения;
- расчет и построение теоретических графиков;
- проверка соответствия принятого теоретического закона статистическим данным по критерию согласия Пирсона;
- анализ полученных зависимостей.

Перечень лабораторных работ

№ п/п	Наименование лабораторных работ	Объем в часах
1.	Исследование надежности технических систем с помощью элементов теории вероятности	2
2.	Построение и расчет структурных схем надежности сложных систем	2
3.	Исследования применения законов распределения отказов	2
4.	Анализ показателей безопасности системы «человек – машина – среда»	2
5.	Расчет характеристик изделий восстанавливаемых и невосстанавливаемых технических систем	2
6.	Оценка и контроль надежности технических устройств	2
7.	Расчет количественных показателей надежности восстанавливаемых объектов	2
8.	Расчет показателей надежности невосстанавливаемой системы с постоянными во времени интенсивностями отказов элементов	2

Перечень практических занятий

№ п/п	Наименование практических занятий	Объем в часах
1.	Анализ надежности систем и их элементов по данным эксплуатации	2
2.	Расчет надежности технических систем и их элементов по данным условий эксплуатации и конструкции изделий	2
3.	Определение техногенного риска системы	2
4.	Оценка техногенного риска системы	2
5.	Расчет количественных показателей надежности восстанавливаемых объектов методом марковских процессов	2
6.	Количественный анализ надежности технической системы	2
7.	Надежность систем при резервировании	2
8.	Логико-графический метод анализа надежности и риска технических систем	2
9.	Риск промышленных предприятий и его оценка	2

5. Темы письменных работ

(курсовых, рефератов, контрольных, расчетно-графических и др.)

5.1. Темы курсовых работ

1. Анализ надежности и техногенного риска технической системы.
2. Структурно-логический анализ технических систем.
3. Расчёт увеличения надёжности элементов.

5.2. Темы рефератов

1. Функция опасности системы «человек – машина – среда» (СЧМС).
2. Проблема анализа надежности и техногенного риска СЧМС.
3. Математический аппарат анализа надежности и техногенного риска.
4. Системный подход к анализу надежности и техногенного риска.
5. Система управления опасностями.
6. Современные аспекты риска: философия риска, психология риска, тенденции.
7. Методы качественного анализа надежности и риска СЧМС.
8. Методы количественного анализа надежности и риска.
9. Сложные системы, их надежность и опасность.
10. Оценка и расчет риска для различных опасных производственных объектов (ОПО).

6. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Компьютерный класс – 1. Посадочных мест – 24.

7. Содержание самостоятельной работы

№ п/п	Наименование самостоятельной работы	Количество часов	
		очная	заочная
1	Изучение теоретического материала	10	
2	Подготовка к практическим занятиям	8	
3	Подготовка к лабораторным работам	6	
4	Выполнение курсовой работы	10	
	ИТОГО	34	

8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

№ п/п	Наименование источника информации	Количество источников информации
Основные источники информации		
1.	Безопасность жизнедеятельности : учеб. для вузов / С.В. Белов [и др.] ; под общ. ред. С.В. Белова – М. : Высш. шк., 1999. – 448 с	10
2.	Решетов, Д.Н. Надежность машин : учеб. для вузов / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М. : Высш. шк., 1988. – 238 с.	10
3.	Переездчиков, И.В. Надежность технических систем и техногенный риск / И.В. Переездчиков, О.В. Крышевич. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998	10
Дополнительные источники информации		
4.	Проппиков, А.С. Надежность машин / А.С. Проппиков. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.	10
5.	Майоров, А.В. Безопасность функционирования автоматизированных объектов / А.В. Майоров, Г.К. Москатов, Г.П. Шибанов. – М. : Машиностроение, 1988. – 264 с.	5
6.	Мушик, Э. Методы принятия технических решений : пер. с нем. / Э. Мушик, П. Мюллер. – М. : Мир, 1990. – 208 с.	5

9. Требования к уровню освоения программы

В результате изучения дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск» **специалист должен**

знать:

- математический аппарат анализа надежности и техногенного риска;
- основные модели типа «человек – машина – среда»;
- основные показатели надежности и методы их определения;
- современные аспекты техногенного риска;
- основы системного анализа;
- алгоритмы исследования опасностей;
- теории и модели происхождения и развития ЧП;
- методы качественного анализа надежности и риска;
- методы количественного анализа надежности и риска;

уметь:

- анализировать современные системы «человек – машина – среда» на всех стадиях их жизненного цикла и идентифицировать опасности;
- вычислять основные показатели надежности систем данного профиля;
- рассчитывать риски и разрабатывать мероприятия по поддержанию их допустимых величин;
- определять стандартные статистические характеристики ЧП (аварий, несчастных случаев, катастроф);

владеть навыками:

- в применении методик качественного анализа опасностей сложных технических систем типа «человек – машина – среда»;
- количественных методов анализа опасностей и оценки риска.

Модуль 1

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНОГЕННОГО РИСКА

Учебные вопросы

• Понятие надежности и события. Классификация событий. Законы алгебры логики. Карты Карно.

• Множества в применении к анализу опасностей. Простейшие операции над подмножествами и их представление. Примеры функций принадлежности.

• Элементы теории вероятности для исследования надежности. Вероятность как математическое понятие.

Изучив данную тему, студент должен:

иметь представление о применении теории вероятности и логических функций к определению надежности;

знать:

• определение надежности;

• определение события;

• классификацию событий;

• схемы последовательных и параллельных соединений элементов системы;

• теорему сложения вероятностей;

• теорему умножения вероятностей;

уметь:

• определять безотказность работы системы;

• составлять таблицу истинности;

• определять вероятность событий;

• оценивать надежность системы;

владеть навыками построения последовательных, параллельных и мостиковых схем для различных технических систем.

Методические рекомендации по изучению темы

При освоении темы необходимо:

• изучить учебный материал по теме «Математический аппарат анализа надежности и техногенного риска», который представлен в теоретической части лабораторной работы;

• акцентировать внимание на определениях надежности и событий, формулах по определению вероятности;

- выполнить задание после теоретической части;
- выполнить тесты по теме;
- ответить на контрольные вопросы.

Лабораторная работа 1

Исследование надежности технических систем с помощью элементов теории вероятности

Цель – научиться проводить анализ надежности технических систем с помощью элементов теории вероятности.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретический материал лабораторной работы.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–5.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Надёжность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надёжность изделия зависит от многочисленного комплекса факторов. Это приводит к тому, что процесс возникновения отказов, а также другие характеристики надёжности носят случайный характер. Для исследования случайных явлений используются вероятностные методы. Рассмотрим понятие «событие».

Событие – это всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти.

Невозможному событию можно приписать вероятность, равную нулю.

$P(A)$ – вероятность события A .

Классификация событий

Несколько событий в данном опыте образуют полную группу событий, если в результате опыта должно появиться хотя бы одно из них. Примеры событий, образующих полную группу:

- 1) выпадение герба и выпадение цифры при бросании монеты;
- 2) появление 1, 2, 3, 4, 5, 6 очков при бросании игральной кости;
- 3) попадание и промах при выстреле;
- 4) безотказная работа изделия и отказ изделия.

Несовместные события — несколько событий называются несовместными в данном опыте, если никакие два из них не могут появиться вместе.

Если в данном опыте могут иметь место два несовместных события, то они называются **противоположными**.

A — событие (безотказная работа изделия).

\bar{A} — противоположное событие (отказ изделия).

Событие достоверное — если оно обязательно появляется в результате данного опыта.

Невозможное событие — если оно не может появиться в результате данного опыта.

Случайное событие — событие, которое может появиться, а может и не появиться в результате данного опыта.

Вероятность события — это степень возможности появления этого события.

Более вероятными являются те события, которые происходят чаще.

Менее вероятными являются те события, которые происходят реже.

Маловероятными являются те события, которые почти никогда не происходят.

Достоверному событию можно приписать вероятность, равную единице.

Расчет надежности сложного объекта, по существу, является определением истинности сложного высказывания. Использование аппарата математической логики позволяет получать формулы для расчета надежности.

1. Если можно утверждать, что система работоспособна, если работоспособны ее элементы a и b , то можно сделать вывод о том, что работоспособность системы (событие c) и работоспособность элементов a и b (событие a и событие b) связаны между собой логическим уравнением работоспособности:

$$c = a \wedge b. \quad (1.1)$$

Логическое уравнение работоспособности для данного случая может быть представлено схемой **последовательного соединения** элементов a и b (рис. 1.1).

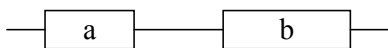


Рис. 1.1. Последовательное соединение элементов

2. Если можно утверждать, что система работоспособна, если работоспособны ее элемент a или элемент b , то можно сделать вывод о том, что работоспособность системы (событие c) и работоспособность элементов a и b (событие a и событие b) связаны между собой логическим уравнением работоспособности:

$$c = a \vee b. \quad (1.2)$$

Этому уравнению соответствует схема **параллельного соединения** элементов a и b (рис. 1.2).

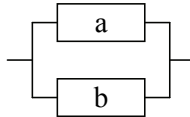


Рис. 1.2. Параллельное соединение элементов

3. Если работоспособное состояние элемента обозначить через a , то неработоспособное состояние этого элемента будет \bar{a} . Логическое отрицание может быть отражено в виде схемы инвертора (рис. 1.3).

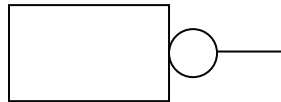


Рис. 1.3. Схема инвертора

4. Логические операции конъюнкции, дизъюнкции и отрицания – основные операции, используемые в теории надежности, так как к ним могут быть сведены все другие логические операции.

5. Сложную логическую функцию можно минимизировать, т. е. преобразовать таким образом, что она будет содержать минимальное число членов.

6. Логические функции можно преобразовать в алгебраические функции, если заменить все логические операции арифметическими по следующим правилам:

$$a \vee b = a + b - a \cdot b; \quad a \wedge b = a \cdot b; \quad \bar{a} = 1 - a. \quad (1.3)$$

Логическая функция работоспособности F_g , у которой все логические операции заменены арифметическими, называется функцией работоспособности, представленной в арифметическом виде F_a .

Чтобы получить формулу для вероятности работоспособного состояния сложного объекта (функцию надежности), необходимо:

- 1) сформулировать словесно условие работоспособности системы;
- 2) на основании словесной формулировки записать логическую функцию работоспособности F_g ;
- 3) минимизировать F_g (исключить повторяющиеся члены);
- 4) в логической функции работоспособности заменить логические операции арифметическими, т. е. получить функцию F_a ;
- 5) в арифметической функции работоспособности заменить простые события (простые высказывания) их вероятностями;
- 6) в полученную формулу подставить числовые значения вероятностей состояний элементов. Решением полученного уравнения является численное значение вероятности работоспособного состояния сложной системы.

Пример 1. Определить вероятность работоспособного состояния тракта передачи данных (рис. 1.4) при условии, что вероятности работоспособных состояний элементов a, b, d, e равны 0,9, а элемента c – 0,8.

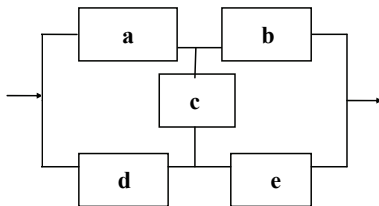


Рис. 1.4. Структура тракта передачи данных типа «мостик»

Решение

1. Словесная формулировка условий работоспособности тракта передачи данных: тракт работоспособен, если работоспособны элементы a и b или элементы a, c и e или элементы d, c и b или элементы d и e .

2. На основании словесной формулировки запишем логическую функцию работоспособности в следующем виде:

$$F_g = (a \wedge b) \vee (a \wedge c \wedge e) \vee (d \wedge c \wedge b) \vee (d \wedge e). \quad (1.4)$$

3. Разложим функцию F_g с целью исключения повторяющихся членов:

$$F_a = c\{d \vee ae \vee bd \vee be\} \vee c\{ad \vee be\}. \quad (1.5)$$

Упростим логическое выражение в первых фигурных скобках:

$$a(d \vee e) \vee b(d \vee e) = (d \vee e)(a \vee b). \quad (1.6)$$

В окончательном виде логическая функция работоспособности представляет:

$$F_n = c\{(d \vee e)(a \vee b)\} \vee \bar{c}\{ad \vee be\}. \quad (1.7)$$

4. Заменяем логические операции арифметическими:

$$F_n = c\{(d + e - de)(a + b - ab \cdot c)\} + (1 - c)(ad + be - ad \cdot be). \quad (1.8)$$

5. Заменяем события a, b, c, d, e их вероятностями и определим количественное значение вероятности работоспособного состояния тракта:

$$P = P_c P_a + P_b - P_a P_b P_d + P_e - P_d P_e + -P_c P_a P_d + P_b P_e - P_a P_d P_b P_e = \\ = 0,8\{(1,8 - 0,81)(1,8 - 0,81)\} + 0,2(0,81 + 0,81 - 0,812) = 0,977.$$

Закодируем состояния каждого из элементов структурной схемы двоичными переменными: 1 (элемент исправный), 0 (элемент в отказовом состоянии).

Тогда функционирование системы можно описать с помощью функций алгебры логики (ФАЛ), используя операции конъюнкции, дизъюнкции и инверсии. В качестве примера составим функцию работоспособности системы с последовательным соединением элементов. Система находится в работоспособном состоянии при условии, что все ее элементы исправны. Обозначим \bar{X} – исправное состояние i -го элемента, X_i – отказовое состояние, $i = 1, 2, \dots, n$. Тогда функция алгебры логики будет иметь вид:

$$Y(X_1, X_2, X_n) = X_1 X_2 X_n. \quad (1.9)$$

Пример 2. Структурная схема системы имеет вид, представленный на рис. 1.5.

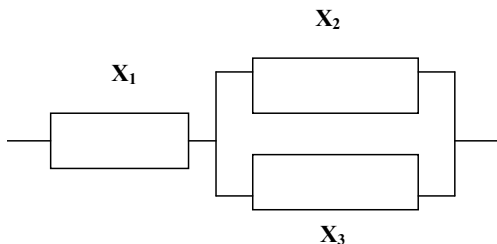


Рис. 1.5. Структурная схема системы с неравнонадежными элементами

Система будет в работоспособном состоянии в следующих случаях: все элементы исправны, исправными являются элементы 1 и 2 или 1 и 3. Тогда функция работоспособности будет иметь вид:

$$y(x_1, x_2, x_3) = x_1 x_2 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3. \quad (1.10)$$

Процедура получения функций может быть формализована. Одним из способов формализации является получение совершенной дизъюнктивной нормальной формы (СДНФ), получаемой из таблицы истинности, соответствующей работоспособному состоянию системы.

Пусть, например, структурная схема системы имеет вид, показанный на рис. 1.6.

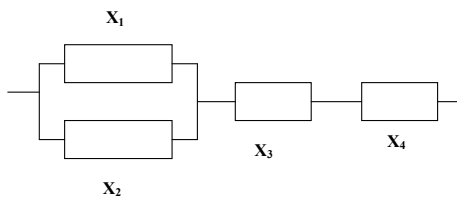


Рис. 1.6. Структурная схема системы со смешанным соединением элементов

Таблица истинности приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Таблица истинности

X_1	X_2	X_3	X_4	Y
1	2	3	4	5
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

$y(x_1, x_2, x_3, x_4)$ имеет значение 1 лишь на трех наборах двоичных аргументов:

0111 (исправными являются элементы x_2, x_3, x_4);

1011 (исправными являются элементы x_1, x_3, x_4);

1111 (все элементы исправны).

Тогда следующая СДНФ будет функцией алгебры логики, описывающей работоспособное состояние системы:

$$y(x_1, x_2, x_3, x_4) = \bar{x}_1 x_2 x_3 x_4 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 x_4 \vee x_1 x_2 x_3 x_4. \quad (1.11)$$

Теорема сложения вероятностей

События могут быть совместными и несовместными. Два события называют **несовместными**, если в результате опыта они не могут появиться одновременно. И наоборот, события считаются **совместными**, если они появляются одновременно в результате такого опыта.

Вероятность суммы двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A + B) = P(A) + P(B). \quad (1.12)$$

Так, вероятность суммы нескольких событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n). \quad (1.13)$$

Более удобная запись теоремы сложения:

$$P(\Sigma A_i) = \Sigma P(A_i). \quad (1.14)$$

Следствие 1. Если события A_1, A_2, \dots, A_n образуют полную группу несовместных событий, то сумма их вероятностей равна единице:

$$\Sigma P(A_i) = 1. \quad (1.15)$$

Противоположными событиями называют два несовместных события, образующих полную группу.

Следствие 2. Сумма вероятностей противоположных событий равна единице:

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1, \quad (1.16)$$

где \bar{A} – событие, противоположное событию A .

Вероятность суммы двух совместных событий A и B выражается формулой

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (1.17)$$

Аналогичную формулу можно написать для произведения двух событий:

$$P(AB) = P(A) + P(B) - P(A+B). \quad (1.18)$$

Общая формула, выражающая **вероятность произведения произвольного числа событий** через вероятности сумм этих событий, взятых по одному, по два, по три и т. д., имеет вид:

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = \Sigma P(A_i) - \Sigma P(A_i + A_j) + \Sigma P(A_i + A_j + A_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(A_i + A_j + A_n). \quad (1.19)$$

Пример 3. Проводится стрельба из артиллерийского орудия по щиту с двумя зонами попадания. Вероятность попадания в первую зону при одном выстреле равна 0,40, во вторую — 0,35. Найти вероятность промаха.

Решение. Обозначим через A — попадание, а через \bar{A} — промах. Тогда событие $A = A_1 + A_2$, где A_1 и A_2 — попадания соответственно в первую и вторую зоны.

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2) = 0,40 + 0,35 = 0,75.$$

$$\text{Тогда } P(\bar{A}) = 1 - P(A) = 1 - 0,75 = 0,25.$$

$$\text{Ответ: } P(\bar{A}) = 0,25.$$

Теорема умножения вероятностей

События могут быть независимыми и зависимыми.

Событие A называют **независимым** от события B , если вероятность события A не зависит от того, произошло событие B или нет.

Событие \bar{A} называют **зависимым** от события B , если вероятность события A меняется в зависимости от того, произошло событие B или нет.

Понятие зависимости и независимости событий можно наглядно показать на следующих примерах.

Пример 4. Предположим, что опыт состоит в бросании двух монет, при этом рассматривают следующие события: событие A — появление герба на первой монете и событие B — появление герба на второй монете.

В этом случае вероятность события A не зависит от того, произошло событие B или нет, следовательно, событие A независимо от события B .

Пример 5. В урне имеется два белых и один черный шар. Два человека вынимают из урны по одному шару, при этом рассматриваются следующие события: событие A – появление белого шара у первого человека и событие B – появление белого шара у второго человека.

Вероятность события A до того, как станет известно что-либо о событии B , равна $2/3$. Если стало известно, что событие B произошло, то вероятность события A становится равной $1/2$, из чего заключаем, что событие A зависит от события B . Вероятность события A , вычисленная при условии, что имело место другое событие B , называется условной вероятностью события A и обозначается $P(A/B)$.

Для условий примера $P(A) = 2/3$, $P(A/B) = 1/2$.

Теорема умножения вероятностей формулируется следующим образом. Вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место, т. е.

$$P(AB) = P(A) P(A/B). \quad (1.20)$$

Два события называют **независимыми**, если появление одного из них не изменяет вероятности появления другого.

Несколько событий называют **независимыми**, если любое из них не зависит от любой совокупности остальных.

Вероятность произведения двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий.

Применяя знак произведения, теорему можно записать так:

$$P(\prod_{A_i}) = \prod P(A_i). \quad (1.21)$$

Пример 6. Устройство состоит из пяти приборов, каждый из которых, независимо от других, может в течение времени t отказать. Отказ хотя бы одного прибора приводит к отказу устройства. За время t вероятность безотказной работы каждого из приборов соответственно равна $P_1(t) = 0,95$; $P_2(t) = 0,99$; $P_3(t) = 0,98$; $P_4(t) = 0,90$; $P_5(t) = 0,93$. Найти надежность устройства за время работы t .

Решение. Введем обозначения вероятностей безотказной работы первого – пятого приборов: $A_1 - A_5$.

Имеем: $A = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5$.

По формуле умножения для независимых событий получим:

$$P(A) = P(A_1)P(A_2)P(A_3)P(A_4)P(A_5) = 0,95 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,90 \cdot 0,93 = 0,76.$$

Формула полной вероятности

Следствием обеих основных теорем — теоремы сложения вероятностей и теоремы умножения вероятностей — является формула полной вероятности.

Требуется определить вероятность некоторого события A , которое может произойти одновременно с одним из событий: H_1, H_2, H_n , образующих полную группу несовместных событий, называемых гипотезами. Докажем, что в этом случае

$$P(A) = \sum P(H_i)P\left(\frac{A}{H_i}\right), \quad (1.22)$$

т. е. вероятность события A вычисляется как сумма произведений вероятности каждой гипотезы на вероятность события при этой гипотезе.

Формулу (1.22) называют формулой полной вероятности, что можно доказать следующим образом.

Гипотезы H_1, H_2, H_n образуют полную группу событий, поэтому событие A может быть только в комбинации с какой-либо из этих гипотез, то есть

$$A = H_1 \cdot A + H_2 \cdot A + \dots + H_n \cdot A. \quad (1.23)$$

Так как гипотезы H_1, H_2, H_n несовместны, то и комбинации $H_1 \cdot A + H_2 \cdot A + \dots + H_n \cdot A$ также несовместны. Применяя теорему сложения, получим для этих гипотез:

$$P(A) = P(H_1 \cdot A) + P(H_2 \cdot A) + \dots + P(H_n \cdot A) = \sum_{i=1}^n P(H_i A). \quad (1.24)$$

Применяя к событию $H_i A$ теорему умножения, получим

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P\left(\frac{A}{H_i}\right), \quad (1.25)$$

что и требовалось доказать.

Пример 8. По движущемуся танку производят три выстрела из артиллерийского орудия. Вероятность попадания при первом выстреле равна 0,5; при втором — 0,7; при третьем — 0,8. Для вывода танка из строя заведомо достаточно трех попаданий. При одном попадании танк выходит из строя с вероятностью 0,3; при двух попаданиях — с вероятностью 0,9. Определить вероятность того, что в результате трех выстрелов танк выйдет из строя.

Решение. Рассмотрим четыре гипотезы: H_0 — в танк не попало ни одного снаряда, H_1 — в танк попал один снаряд, H_2 — в танк попало два снаряда и H_3 — в танк попало три снаряда.

Пользуясь теоремами сложения и умножения, найдем вероятности этих гипотез:

$$P(H_0) = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 0,03;$$

$$P(H_1) = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,8 = 0,22;$$

$$P(H_2) = 0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,8 + 0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 0,47;$$

$$P(H_3) = 0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 0,28.$$

Условные вероятности события A (выход из строя танка) при этих гипотезах равны: $P(A/H_0) = 0$; $P(A/H_1) = 0,3$; $P(A/H_2) = 0,9$; $P(A/H_3) = 1,0$.

Применяя формулу полной вероятности, получим: $P(A) = 0,769$.

На практике приходится встречаться с задачами, в которых один и тот же опыт или аналогичные опыты повторяются многократно. В результате каждого опыта может появиться или не появиться событие A , причем нас интересует не результат каждого отдельного опыта, а общее число появлений события A в серии опытов. Например, если производится группа выстрелов по одной и той же цели, то нас интересует не результат каждого выстрела, а общее число попаданий.

Если проводят n независимых опытов, в каждом из которых событие A появляется с вероятностью p , то вероятность того, что событие появится ровно m раз, выражается формулой Бернулли

$$P_m = C_n^m \cdot p^m \cdot q^{n-m}, \text{ где } C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}; q = 1 - p. \quad (1.26)$$

Пример 9. При проведении стрельб из орудия по щиту было зафиксировано десять промахов ($m = 10$) из пятисот выстрелов ($n = 500$).

Определить вероятность того, что при ста выстрелах будет ровно четыре промаха, если считать, что все выстрелы независимы и вероятность промаха в каждом выстреле одинакова.

Решение. Найдем вероятность промаха при одном выстреле по формуле

$$P = \frac{m}{n} = \frac{10}{500} = 0,002.$$

Далее по формуле найдем вероятность появления четырех промахов из ста выстрелов

$$P_4 = C_{100}^4 0,2^4 0,8^{100-4} \approx 0,000003.$$

Ответ: $P_4 = 0,000003$.

Задания

1. На рис. 1.7 изображена структурная схема системы, представляющая собой основное (последовательное) соединение элементов. Определить безотказность работы системы.

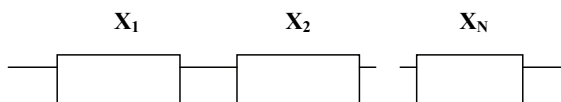


Рис. 1.7. Структурная схема системы с основным соединением элементов

На структурной схеме x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ – состояние i -го элемента системы, кодируемое 0, если элемент находится в отказовом состоянии, и 1, если он исправный. В данном случае система исправна, если исправны все ее элементы.

2. Требуется оценить надежность систем, структурные схемы которых приведены на рис. 1.8. Вероятности безотказной работы элементов соответственно равны p , $i = 1, 2, 3, 4$.

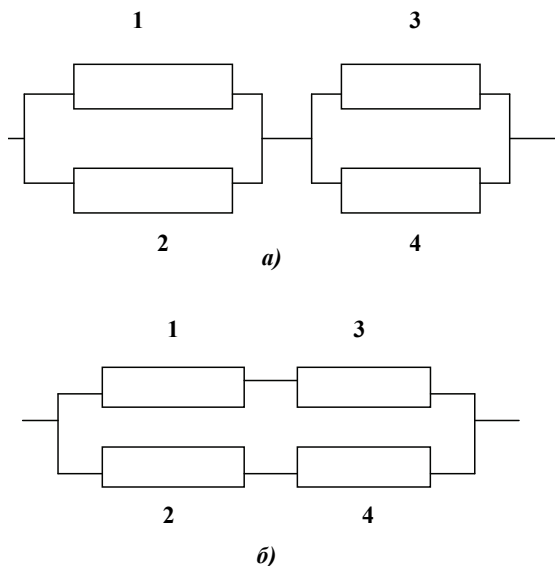


Рис. 1.8. Структурные схемы для отдельного (а) и общего (б) резервирования

3. Требуется оценить надежность мостиковой системы, структурная схема которой изображена на рис. 1.9. Вероятности безотказной работы элементов соответственно равны p , $i = 1, 2, 3, 4, 5$.

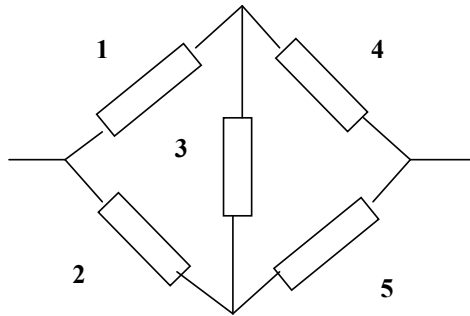


Рис. 1.9. Структурная схема мостиковой системы

4. Проводится стрельба из артиллерийского орудия по щиту. В результате проведения 500 выстрелов число попаданий оказалось равным 450. Найти вероятность попадания по щиту при одном выстреле.

5. Структурная схема системы представляет собой дублированную систему с неравнонадежными, постоянно включенными подсистемами (рис. 1.10). Определить безотказность работы системы.

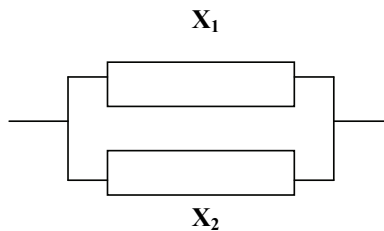


Рис. 1.10. Структурная схема дублированной системы

На рис. 1.10 X_1 и X_2 — состояния элементов системы.

Составить таблицу истинности двух двоичных переменных (табл. 1.1). Описать работоспособное состояние системы с помощью функции алгебры логики. Определить безотказность работы системы.

ТЕСТЫ

1. Надежность – это:
 - 1) всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти;
 - 2) свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования;
 - 3) степень возможности появления события.
2. Событие представляет
 - 1) всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти;
 - 2) свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров;
 - 3) степень возможности появления события.
3. Несовместимыми называют события:
 - 1) если в результате опыта они не могут появиться одновременно;
 - 2) если они появляются одновременно в результате такого опыта;
 - 3) если в опыте могут иметь место два несовместных события.
4. При последовательном соединении элементов систему считают работоспособной:
 - 1) если работоспособны ее элементы a или b ;
 - 2) работоспособны ее элементы a и b ;
 - 3) работоспособны ее элементы a и/или b .
5. При параллельном соединении элементов система считается работоспособной:
 - 1) если работоспособны ее элементы a или b ;
 - 2) работоспособны ее элементы a и b ;
 - 3) работоспособны ее элементы a и/или b .
6. Совместимыми называют события:
 - 1) если в результате опыта они не могут появиться одновременно;
 - 2) они появляются одновременно в результате такого опыта;
 - 3) в опыте могут иметь место два несовместных события.
7. Противоположными называют события:
 - 1) если в опыте могут иметь место два несовместных события;
 - 2) в результате опыта они не могут появиться одновременно;
 - 3) они появляются одновременно в результате такого опыта.

8. Вероятность события определяется:
 - 1) как произведение всех возможностей появления события;
 - 2) степень возможности появления этого события;
 - 3) сумма всех возможностей появления события.
9. Теорема сложения вероятностей формулируется:
 - 1) вероятность суммы двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место;
 - 2) вероятность суммы двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий;
 - 3) вероятность суммы двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий.
10. Теорема умножения вероятностей представляет:
 - 1) вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место;
 - 2) вероятность произведения двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий;
 - 3) вероятность произведения двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий.

Контрольные вопросы

1. Для чего составляется таблица истинности?
2. Как определить вероятность достоверного события?
3. Чему равна вероятность достоверного события?
4. Чему равна вероятность невозможного события?
5. Суммой событий A и B называют событие $C = A...B$. (Поставьте недостающий логический оператор.)
6. Произведением событий A и B называют событие $C = A...B$. (Проставьте недостающий логический оператор.)
7. Как называется совокупность событий, хотя бы одно из которых должно произойти?
8. Какую группу событий составляют отказ и безотказность изделий?
9. Если любые два события группы не могут произойти одновременно, то такая группа событий считается совместной или несовместной?
10. Чему равна вероятность полной группы событий A , B и C , образующих полную группу событий, то есть хотя бы одно из которых обязательно осуществится?
11. Чему равна сумма вероятностей полной группы несовместных событий A , B и C ?
12. Чему равна сумма вероятностей противоположных событий?

Модуль 2

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНОГЕННОГО РИСКА

Учебные вопросы

- Система. Сложная и большие системы. Структура системы. Состояние системы. Вероятностная система. Система моделей.
- Система «человек – машина – среда» (СЧМС). Система управления опасностями. Определение СЧМС. Компоненты. Иерархия. Связь с проблемой безопасности.
- Информационные системы. Функциональные системы управления опасностями.

Изучив данную тему, студент должен:

иметь представление о вероятностной системе и системе «человек – машина – среда»;

знать:

- определение системы;
- определение элемента;
- структурную надежность;
- законы распределения (Пуассона, экспоненциальный, нормальный, логарифмический, гамма-распределение, Вейбулла);
- классификацию ошибок в системе «человек – машина – среда»;
- формулу безопасности;

уметь:

- преобразовывать сложные структурные схемы различными методами;
- проводить исследования надежности технической системы на основе законов распределения отказов;
- проводить анализ надежности технических систем «человек – машина – среда»;

владеть навыками преобразования сложных структурных схем с использованием различных методов.

Методические рекомендации по изучению темы

При освоении темы необходимо:

- изучить учебный материал по теме «Системный подход к анализу надежности и техногенного риска»;

- акцентировать внимание на законах распределения отказов и их применение к определению показателей для системы «человек – машина – среда»;
- выполнить задание после теоретической части в виде задач;
- выполнить тесты по теме;
- ответить на контрольные вопросы.

Лабораторная работа 2

Построение и расчет структурных схем надежности сложных систем

Цель – научиться оценивать надежность сложных систем с последовательно и параллельно соединенными элементами.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретический материал лабораторной работы.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–8.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Сложная система – это объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы (компоненты), каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

При анализе надежности сложных систем их разбивают на элементы (компоненты) с тем, чтобы вначале рассмотреть параметры и характеристики элементов, а затем оценить работоспособность всей системы.

Элемент – это составная часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами.

Возможно восстановление работоспособности элемента независимо от других частей и элементов системы.

Анализ надежности сложных систем имеет свои особенности. Влияние различных отказов и снижение работоспособности элементов системы по-разному скажутся на надежности всей системы.

1. Структурные схемы расчета надежности сложных схем

Надежность отдельных элементов оказывает влияние на надежность всей системы.

Структурная надежность – это составляющая, обусловленная структурой системы, т. е. составом элементов, их взаимосвязями,

пропускными способностями, без количественного учета режимных особенностей функционирования элементов.

Схемы, изображающие различные соединения элементов изделия или системы, называют **структурными схемами надежности изделия** или системы.

Структурные схемы надежности строят исходя из логического анализа работоспособности системы.

При построении структурных схем необходимо придерживаться следующих правил.

1. Элементы изображаются в виде прямоугольников и обозначаются номерами или индексами.

2. Одна сторона прямоугольника считается входом, другая — выходом элемента.

3. Элемент считается работающим безотказно, если условный сигнал с входа элемента проходит на выход.

4. Отказ элемента означает невозможность передачи через него условного сигнала (т. е. в цепи передачи сигнала возникает разрыв).

5. Линии, соединяющие элементы друг с другом, характеризуются абсолютной безотказностью.

6. Путь передачи условного сигнала (функционального в смысле надёжности воздействия) состоит из последовательного соединения линий и элементов.

Соединения элементов различаются в зависимости от того, как надежность отдельных элементов влияет на надежность всей технической системы. Различают три простейших способа соединения элементов: последовательное, параллельное, смешанное. Сначала рассмотрим структурные схемы надежности для невозмущаемых элементов.

2. Последовательное соединение элементов

Последовательным называется такое соединение элементов в системе, когда отказ любого элемента приводит к отказу всей системы, т. е. последовательная структура работоспособна, если все ее элементы работоспособны.

Структурная схема последовательного соединения представлена на рис. 2.1.

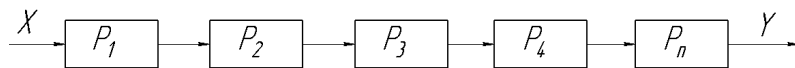


Рис. 2.1. Последовательное соединение элементов

Элементы системы будем считать независимыми, т. е. вероятность отказа любого элемента в системе не зависит от вероятности отказа других элементов.

Вероятность безотказной работы технической системы из последовательно соединенных независимых элементов есть произведение вероятностей безотказной работы всех его элементов:

$$P_{\Sigma}(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_i(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (2.1)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы, n – число элементов.

Вероятность отказа последовательной структуры:

$$Q_{\Sigma}(t) = 1 - P_{\Sigma}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - q_i(t)], \quad (2.2)$$

где $q(t)$ – вероятность отказа i -го элемента.

Если все элементы подчиняются экспоненциальному закону надежности, т. е. $\lambda = \lambda_1 = const$, то

$$P_{\Sigma}(t) = e^{-\lambda_{\Sigma}t}, \quad (2.3)$$

т. е. вся последовательно соединенная структура также подчиняется экспоненциальному закону надежности, причем $\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$.

Вероятность безотказной работы системы из n одинаковых элементов:

$$P_{\Sigma}(t) = e^{-n\lambda t}. \quad (2.4)$$

Среднее время безотказной работы:

$$T = \frac{1}{n\lambda}. \quad (2.5)$$

Следовательно, с ростом числа элементов среднее время безотказной работы уменьшается.

3. Параллельное соединение элементов

Параллельным называют такое соединение элементов в структурной схеме технической системы, когда отказ наступает лишь при отказе всех элементов.

Параллельную структуру называют также избыточной или резервированной, поскольку она содержит элементов больше, чем это необходимо для ее нормальной работы. При отказе одного или нескольких элементов функция структуры выполняется оставшимися в работе элементами, если последние удовлетворительно выполняют функции отказавших.

Схема замещения (по надежности) системы с параллельной структурой представлена на рис. 2.2.

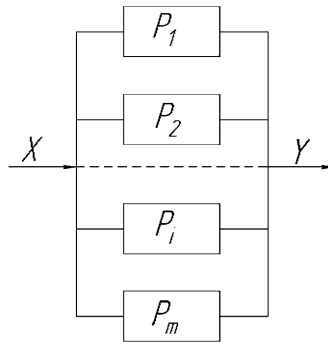


Рис. 2.2. Схема замещения (по надежности) системы с параллельной структурой

Параллельное соединение элементов называют **резервным**, в то время как **последовательное** соединение элементов — **основным** соединением.

Если отказы элементов взаимно независимы, вероятность отказа системы определится как произведение вероятностей отказов всех её элементов:

$$Q_{\Sigma}(t) = q_1(t)q_2(t) \dots q_m(t) = \prod_{j=1}^m q_j(t). \quad (2.6)$$

Вероятность безотказной работы системы из n элементов:

$$P_{\Sigma}(t) = 1 - Q_{\Sigma}(t). \quad (2.7)$$

Если надежность элементов системы определяется экспоненциальным законом $\lambda(t) = \lambda(t)_1 = const$; $p(t)_i = e^{-\lambda(t)}$, то вероятность безотказной работы системы

$$P_{\Sigma}(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - e^{-\lambda_j t}). \quad (2.8)$$

Если система составлена из m одинаковых элементов с $\lambda(t) = \lambda_j(t) = const$, то, приняв $P_1(t) = P_2(t) = \dots P_j(t) \dots = P_{mj}(t)$, $q_1(t) = q_2(t) \dots = \dots q_j(t) \dots = q_m(t)$:

$$Q_{\Sigma} = q^m = (1 - e^{-\lambda t})^m; \quad (2.9)$$

$$P_{\Sigma} = 1 - q^m. \quad (2.10)$$

Среднее время безотказной работы системы в этом случае

$$T = \int_0^{\infty} P_{\Sigma}(t) dt. \quad (2.11)$$

4. Структурные схемы надежности систем с другими видами соединения элементов

Следует отметить, что в практике проектирования технических систем часто используют структурные схемы надежности с **параллельно-последовательным соединением** элементов. Надежность такой схемы соединения определяют по формуле

$$P(T) = p^3(T) + 3p^2(T)Q(T), \quad (2.12)$$

где $p(t)$ – надежность каждого элемента за время работы t одинакова; $q(t) = 1 - p(t)$.

Широкое применение в проектировании нашли так называемые **мостиковые схемы**. Надежность такой схемы определяют из соотношения вида

$$P(t) = p^5(t) + 5p^4(t)q(t) + 8p^3(t)q^2(t) + 2p^2(t)q^3(t). \quad (2.13)$$

Здесь все элементы также имеют одинаковую надежность.

Различают структурные схемы надежности с поканальным и поэлементным резервированием.

Структурная схема надежности с поканальным резервированием показана на рис. 2.3.

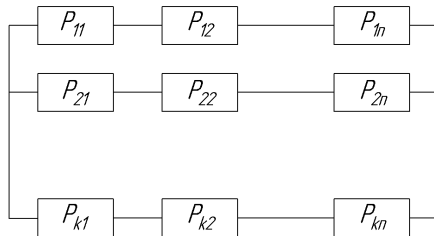


Рис. 2.3. Структурная схема надежности с поканальным резервированием

Формула надежности выглядит так:

$$P = 1 - (1 - p^n)^k. \quad (2.14)$$

В практике проектирования часто используют структурную схему надежности с поэлементным резервированием (рис. 2.4).

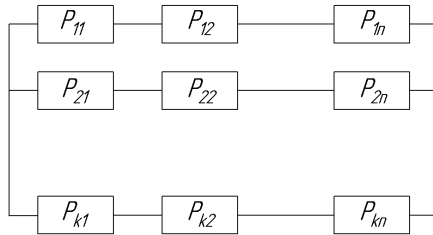


Рис. 2.4. Структурная схема надежности с поэлементным резервированием

Надежность такой системы определяют по формуле

$$P = [1 - (1 - p^k)]^n. \quad (2.15)$$

Структурная схема с поэлементным резервированием имеет более высокую надежность по сравнению с поканальным резервированием.

5. Смешанное соединение элементов

В технике часто встречаются задачи, когда структурные схемы нельзя отнести ни к последовательному, ни к параллельному соединению элементов. Для анализа подобных схем используются специальные методы преобразований.

Метод свертки. Используют метод свертки, состоящий в преобразовании исследуемых сложных систем со смешанным соединением элементов в более простые схемы, для которых имеются несложные выражения для расчета надежности.

Исходная схема представлена на рис. 2.5.

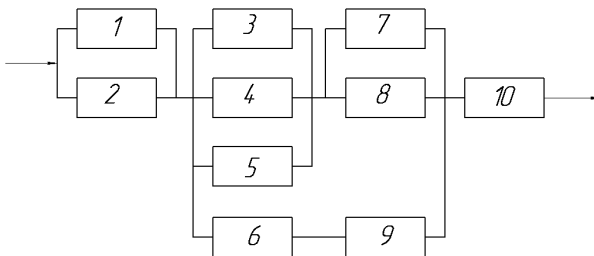


Рис. 2.5. Структурная схема со смешанным соединением элементов

Метод свертки состоит из нескольких этапов. На первом этапе все параллельные соединения заменяются эквивалентными элементами. После первого этапа преобразований схема принимает вид (рис. 2.6).

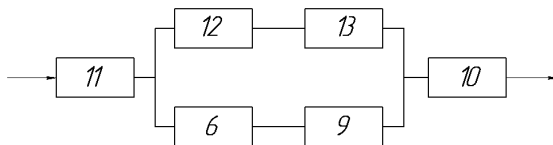


Рис. 2.6. Первый этап преобразования

Вероятности безотказной работы эквивалентных элементов в схеме на рис. 2.6 определяются на основании формул:

$$\begin{aligned}
 p_{11} &= 1 - q_{11} = 1 - q_1 \times q_2; \\
 p_{12} &= 1 - q_{12} = 1 - q_3 \times q_4 \times q_5; \\
 p_{13} &= 1 - q_7 \times q_8.
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

На втором этапе все последовательные соединения элементов заменяются эквивалентными элементами. После второго этапа преобразований схема принимает вид (рис. 2.7).

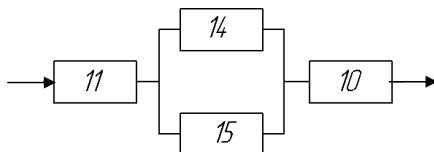


Рис. 2.7. Второй этап преобразования

На третьем этапе вновь все параллельные соединения заменяются эквивалентными элементами. Результат третьего этапа показан на рис. 2.8.

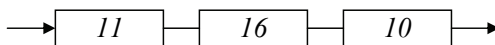


Рис. 2.8. Третий этап преобразования

На четвертом этапе определяется вероятность безотказной работы всей системы:

$$P_c = p_{11} \cdot p_{16} \cdot p_{10}.
 \tag{2.17}$$

Метод свертки является весьма эффективным методом определения показателей надежности невосстанавливаемых последовательно-параллельных схем. Число элементов мало влияет на сложность проведения расчетов, в основном происходит увеличение числа этапов расчета.

Применение формулы полной вероятности при расчете надежности сложных систем. Рассчитаем вероятность безотказной работы структурной схемы, представленной на рис. 2.9.

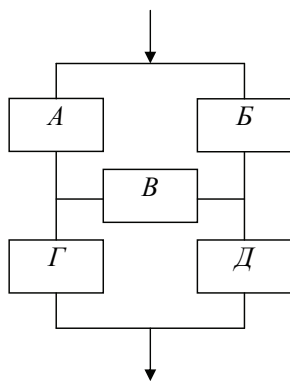


Рис. 2.9. Сложная система

Вероятность события «С», которое может произойти вместе с одной из гипотез H_1, H_2, \dots, H_n , образующих полную группу несовместных событий, равна сумме парных произведений вероятностей каждой из этих гипотез на отвечающие им условные вероятности наступления события «С»:

$$P(C) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P(C/H_i). \quad (2.18)$$

Формулу полной вероятности к расчету безотказности такой системы рекомендуется применять в последовательности:

- 1) выбрать элемент, относительно которого будут выдвигаться гипотезы о его работоспособности. Полная система здесь содержит лишь две несовместные гипотезы: H_1 – элемент работоспособен; H_2 – элемент отказал;
- 2) с учетом выбранного элемента изучить условные вероятности безотказной работы системы при выдвинутых гипотезах. Для наглядности полезно изображать структурные схемы системы при реализации каждой из гипотез;
- 3) определить безусловную (полную) вероятность безотказной работы системы.

Например, пусть гипотезы выдвигаются относительно элемента «B»: H_1 – элемент «B» работоспособен. Расчетная схема имеет вид (рис. 2.10). H_2 – элемент «B» отказал. Соответствующая схема показана на рис. 2.11.

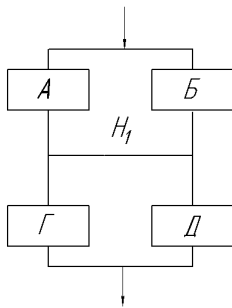


Рис. 2.10. Расчетная схема для гипотезы H_1

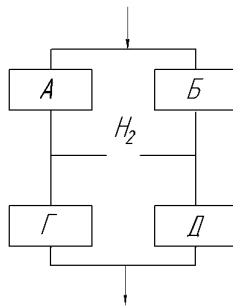


Рис. 2.11. Расчетная схема для гипотезы H_2

Вероятность первой гипотезы есть вероятность безотказной работы элемента «B»:

$$P(H_1) = p_B(t). \quad (2.19)$$

Структурная схема системы при этом – смешанное соединение четырех элементов ($A \parallel \tilde{A}$ и $\tilde{A} \parallel \tilde{A}$, затем последовательное соединение этих групп). Опуская знаки t , т. е. обозначая $P(t) = P$, $Q(t) = Q$, имеем

$$P(C/H_1) = P_{AB} \times P_{\Gamma D} = [1 - (1 - p_A)(1 - p_B)] \cdot [1 - (1 - p_\Gamma)(1 - p_D)]. \quad (2.20)$$

Вероятность второй гипотезы – вероятность отказа элемента «B»:

$$P(H_2) = q_B(t) = 1 - p_B(t). \quad (2.21)$$

Структурная схема системы – смешанное соединение тех же четырех элементов (вначале по два последовательно в цепях, затем две цепи параллельно).

$$P(C/H_2) = 1 - Q_\Sigma = 1 - Q_{A\Gamma} Q_{B\Delta} = 1 - (1 - P_{A\Gamma})(1 - P_{B\Delta}). \quad (2.22)$$

Полная (безусловная) вероятность безотказной работы системы:

$$\begin{aligned} P(C) &= P(H_1)P\left(\frac{C}{H_1}\right) + P(H_2)P\left(\frac{C}{H_2}\right) = \\ &= p_B [1 - (1 - p_A)(1 - p_B)] [1 - (1 - p_\Gamma)(1 - p_D)] + \\ &+ (1 - p_B) [1 - (1 - p_A p_\Gamma)(1 - p_B p_D)] \end{aligned} \quad (2.23)$$

По $P(C)$ могут быть определены и другие критерии безотказности.

Для структурной схемы рис. 2.9 гипотезы о работоспособности можно было выдвинуть применительно к любому элементу. Формула полной вероятности универсальна. Пользуясь ею, можно получить формулу для расчета надежности при любом соединении элементов.

Задания

1. Построить на основе представленной принципиальной схемы асинхронного электродвигателя (рис. 2.12) структурную схему для расчета надежности технической системы.

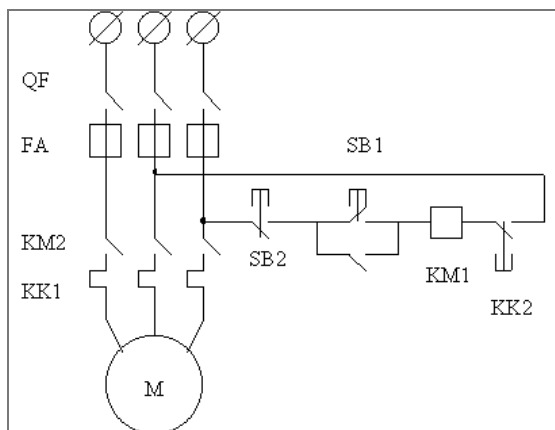


Рис. 2.12. Схема привода асинхронного электродвигателя
 М – двигатель; QF – контакты; FA – защитные элементы;
 KM1, KM2 – катушки; KK1, KK2 – тепловые реле;
 SB1 – выключатель 1; SB2 – выключатель 2; L – источник тока

Таблица 2.1

Исходные данные

Наименование элемента	Число элементов	Значение интенсивности отказов, 1/ч
1. Двигатель М	1	$0,5 \cdot 10^{-6}$
2. Контакты QF	3	$0,5 \cdot 10^{-6}$
3. Защитные элементы FA	3	$0,5 \cdot 10^{-6}$
4. Катушка KM 1	1	$0,1 \cdot 10^{-6}$
5. Катушка KM 2	3	$0,5 \cdot 10^{-6}$
6. Тепловые реле KK1	3	$0,5 \cdot 10^{-6}$

Наименование элемента	Число элементов	Значение интенсивности отказов, 1/ч
7. Тепловые реле КК2	1	$0,1 \cdot 10^{-6}$
8. Выключатель SB1	1	$0,1 \cdot 10^{-6}$
9. Выключатель SB2	1	$0,1 \cdot 10^{-6}$

2. Рассчитать вероятность безотказной работы в течение года системы, состоящей из десяти одинаковых элементов, включенных последовательно друг другу в электрической схеме. Известно, что интенсивность отказов одного элемента составляет 0,01 1/год.

Структурная схема для расчета надежности системы имеет вид (рис. 2.13).

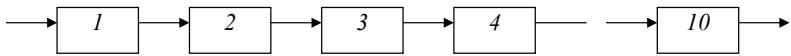


Рис. 2.13. Схема для расчета

3. Система составлена из трех одинаковых элементов, соединенных параллельно, с интенсивностью отказов $\lambda = 0,01 \text{ год}^{-1}$. Найти безотказность системы в течение года.

4. Найти вероятность безотказной работы схемы P_c (рис. 2.14), для которой вероятности безотказной работы элементов равны соответственно

$$\begin{aligned}
 P(1) &= P(4) = P(7) = P(10) = 0,996; \\
 P(2) &= P(5) = P(8) = P(11) = 0,9751; \\
 P(3) &= P(6) = P(9) = P(12) = 0,999.
 \end{aligned}$$

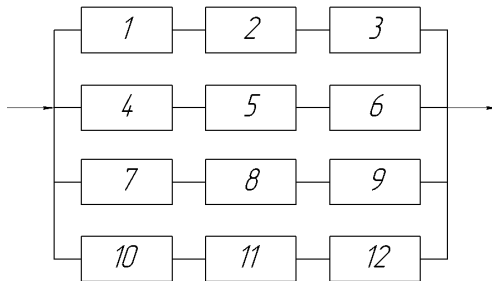


Рис. 2.14. Схема технической системы

5. Даны вероятности безотказной работы элементов $P(1) = P(2) = 0,96$; $P(3) = 0,98$; $P(4) = 0,995$; $P(5) = 0,999$. Найти вероятность безотказной работы для схемы, представленной на рис. 2.15.

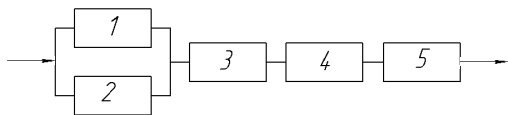


Рис. 2.15. Рабочая схема

6. Техническая система предназначена для выполнения некоторой задачи. С целью обеспечения работоспособности система спроектирована со смешанным соединением элементов (рис. 2.16).

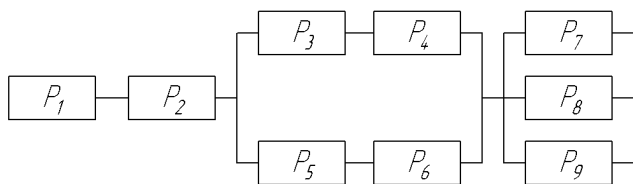


Рис. 2.16. Структурная схема надежности технической системы

Определить надежность системы, если известно, что надежность ее элементов равна:

$$p_1 = 0,99; p_2 = 0,98; p_3 = 0,9; p_4 = 0,95; p_5 = 0,9; p_6 = 0,9; p_7 = 0,8;$$

$$p_8 = 0,75; p_9 = 0,97.$$

7. Найти вероятность безотказной работы цепи, представленной на рис. 2.17. Вероятности безотказной работы каждого блока соответственно равны: $P(A) = 0,9$; $P(B) = 0,2$; $P(C) = 0,75$; $P(D) = 0,89$; $P(E) = P(F) = 0,57$; $P(G) = 0,99$.

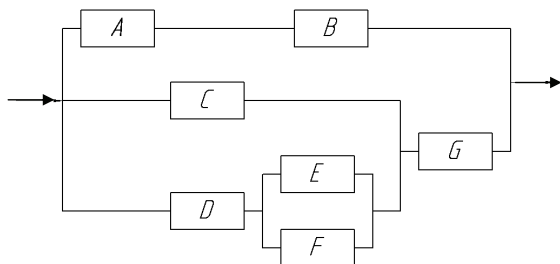


Рис. 2.17. Схема цепи

8. Рассчитать вероятность безотказной работы структурной схемы, представленной на рис. 2.9, если вероятности безотказной работы каждого элемента соответственно равны: $P(A)=0,9$; $P(B)=0,8$; $P(B)=0,75$; $P(G)=0,89$; $P(D)=0,99$.

Лабораторная работа 3

Исследование применения законов распределения отказов

Цель – провести исследования надежности технической системы на основе законов распределения отказов.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретический материал лабораторной работы.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–11.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Теоретические сведения

Модели распределений отказов, используемых в теории надежности

Закон распределения Пуассона

Распределение Пуассона описывает закономерность появления случайных отказов в сложных системах. Этот закон нашел широкое применение при определении вероятности появления и восстановления отказов.

Случайная величина распределена по **закону Пуассона**, если вероятность того, что эта величина примет определенное значение m , выражается формулой

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}, \quad (2.24)$$

где λ – параметр распределения (некоторая положительная величина); $m = 0, 1, 2 \dots$

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины X для закона Пуассона равны параметру распределения λ : $M_x = D_x = \lambda$.

Экспоненциальное распределение

Экспоненциальный закон распределения используют для прогнозирования надежности в период нормальной эксплуатации изделий, когда **постепенные отказы** еще не проявились и надежность характеризуется **внезапными отказами**. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную **интенсивность**.

Плотность распределения экспоненциального закона (рис. 2.18) описывается соотношением

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}; \quad (2.25)$$

функция распределения этого закона – соотношением

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}; \quad (2.26)$$

функция надежности

$$P(x) = 1 - F(x) = e^{-\lambda x}; \quad (2.27)$$

математическое ожидание случайной величины X

$$M_x = \frac{1}{\lambda}; \quad (2.28)$$

дисперсия случайной величины X

$$D_x = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (2.29)$$

Все задачи, решаемые в теории надежности, при использовании экспоненциального закона оказываются намного проще, чем при использовании других законов распределения. Основная причина такого упрощения состоит в том, что при экспоненциальном законе вероятность безотказной работы зависит только от длительности интервала и не зависит от времени предшествующей работы.

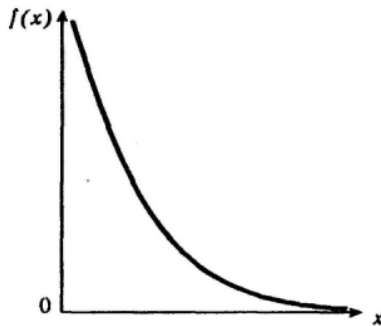


Рис. 2.18. График плотности экспоненциального распределения

Нормальный закон распределения

Нормальный закон распределения называют законом Гаусса. Основная особенность этого закона состоит в том, что он является **предельным законом**, к которому приближаются другие законы распределения. В теории надежности его используют для описания постепенных отказов, когда распределение времени безотказной работы вначале имеет низкую плотность, затем максимальную и далее плотность снижается.

Распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие примерно равнозначные факторы.

Нормальный закон распределения описывается плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.30)$$

где $e = 2,71828$ – основание натурального логарифма; $\pi = 3,14159$; m и σ – параметры распределения, определяемые по результатам испытаний. Колоколообразная кривая плотности распределения приведена на рис. 2.19.

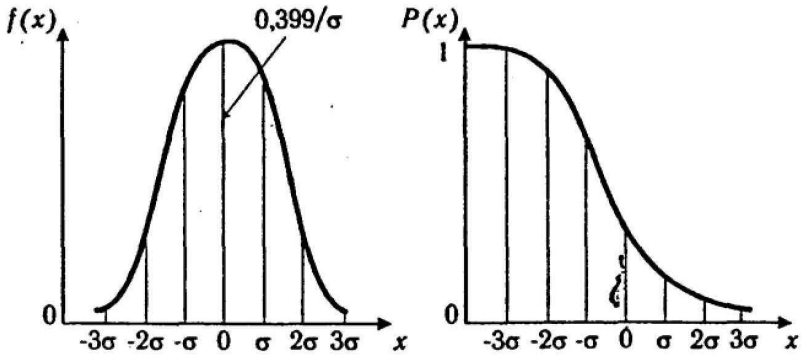


Рис. 2.19. Кривая плотности распределения

Параметр $m = M_x$ представляет собой среднее значение случайной величины X , оцениваемое по формуле

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.31)$$

Параметр σ – среднее квадратическое отклонение случайной величины X , оцениваемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2}. \quad (2.32)$$

Интегральная функция распределения имеет вид

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (2.33)$$

Вычисление интегралов заменяют использованием таблиц нормального распределения, при котором $M_x = 0$ и $\sigma = 1$. Для этого распределения функция плотности вероятности имеет одну переменную t и выражается зависимостью

$$f_0(t) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (2.34)$$

Величина t является центрированной (так как $M_t = 0$) и нормированной (так как $\sigma = 1$). Функция распределения соответственно запишется в виде:

$$F_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2.35)$$

в формулу вместо t подставить ее значение:

$$t = \frac{(x - M_x)}{\sigma}, \quad (2.36)$$

при этом t называют **квантилью** нормированного нормального распределения.

Плотность распределения и вероятность отказа соответственно равны:

$$f(x) = f_0(t)/\sigma; Q(x) = F_0(t); \quad (2.37)$$

тогда вероятность безотказной работы

$$P(x) = 1 - F_0(t). \quad (2.38)$$

В работах по надежности часто вместо интегральной функции распределения $F_0(t)$ используют функцию Лапласа:

$$\Phi^*(x) = \int_0^t f_0(t) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-t^2/2}. \quad (2.39)$$

Очевидно, что

$$F_0(t) = 0,5 + \Phi^*(t); Q(x) = 0,5 + \Phi^*\left(\frac{x - M_x}{\sigma}\right); P(x) = 0,5 - \Phi^*\left(\frac{x - M_x}{\sigma}\right). \quad (2.40)$$

Логарифмически нормальное распределение

Логарифмически нормальное распределение нашло широкое применение в теории надежности. Его успешно применяют для описания наработки до отказа изделий.

Неотрицательная случайная величина распределена **логарифмически нормально**, если ее логарифм распределен нормально. Плотность распределения для различных значений приведена на рис. 2.20.

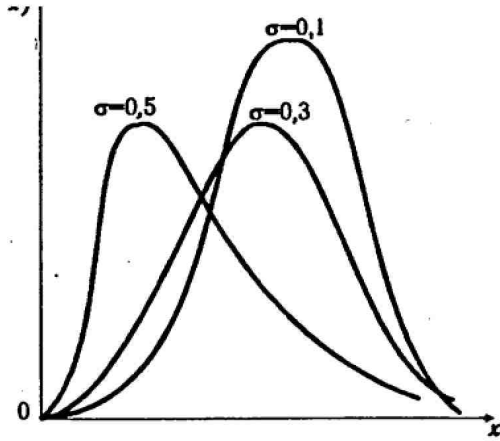


Рис. 2.20. Плотность логарифмически нормального распределения

Плотность распределения описывается зависимостью

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - M)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.41),$$

где M и σ – параметры, оцениваемые по результатам n испытаний до отказа.

Для логарифмически нормального закона распределения функция надежности выглядит так:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\ln(x/M)}{\sigma}} \int e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (2.42)$$

Математическое ожидание наработки до отказа:

$$M_x = e^{(M + \sigma^2/2)}. \quad (2.43)$$

Среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации соответственно равны:

$$\sigma_x = \sqrt{e^{2M + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)}; \quad (2.44)$$

$$v_x = \frac{\sigma_x}{M_x} = \sqrt{e^{\sigma^2} - 1}. \quad (2.45)$$

При $v_x \leq 0,3$ полагают, что $v_x = \sigma$, при этом ошибка не более 1%.

Математическое ожидание M_x , среднее квадратическое отклонение σ_x и коэффициент вариации v_x наработки до отказа соответственно равны:

$$M_x = x_0 e^{2,65\sigma^2}; \quad (2.46)$$

$$\sigma_x = M_x \sqrt{\left(\frac{M_x}{x_0}\right)^2 - 1}; \quad (2.47)$$

$$v_x = \sqrt{\left(\frac{M_x}{x_0}\right)^2 - 1}. \quad (2.48)$$

Распределение Вейбулла

Закон Вейбулла представляет собой **двухпараметрическое распределение**. Этот закон является универсальным, так как при соответствующих значениях параметров превращается в нормальное, экспоненциальное и другие виды распределений. Плотность распределения описывается зависимостью

$$f(x) = \alpha \lambda x^{\alpha-1} \exp(-\lambda x^\alpha); \quad (2.49)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt. \quad (2.50)$$

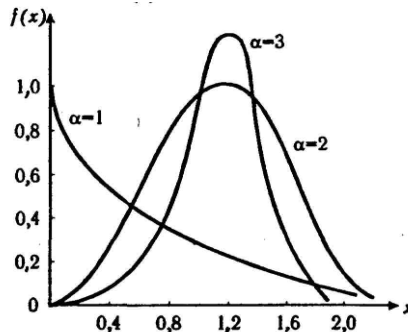


Рис. 2.21. Плотность распределения Вейбулла для $\lambda = 1$

Гамма-распределение

Гамма-распределение является двухпараметрическим распределением. Оно занимает важное место в теории надежности. Плотность распределения имеет ограничение с одной стороны $0 \leq x < \infty$. Если параметр α формы кривой распределения принимает целое значение, то это свидетельствует о вероятности появления такого

же числа событий (например, отказов) при условии, что они независимы и появляются с постоянной интенсивностью λ . Гамма-распределение широко применяют при описании появления отказов стареющих элементов, времени восстановления, наработки на отказ резервированных систем. При различных параметрах гамма-распределение принимает разнообразные формы, что и объясняет его широкое применение.

Плотность вероятности гамма-распределения определяется равенствами:

$$f(\chi) = [\lambda^\alpha / \Gamma(\alpha)] \chi^{\alpha-1} e^{-\lambda\chi} \text{ при } \chi \geq 0; \quad (2.51)$$

$$f(\chi) = 0 \text{ при } \chi < 0, \quad (2.52)$$

где $\lambda > 0, \alpha > 0$.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty \chi^{\alpha-1} e^{-x} dx. \quad (2.53)$$

Кривая изменения плотности гамма-распределения приведена на рис. 2.22.

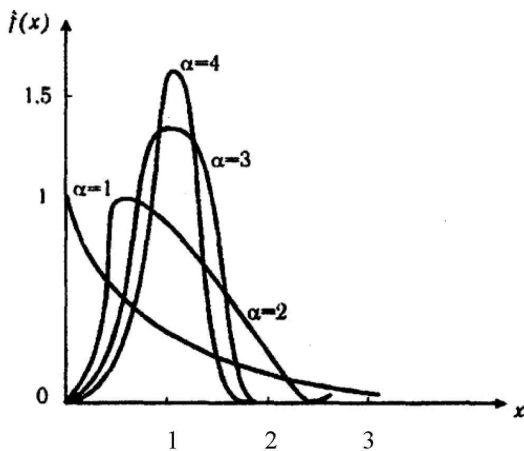


Рис. 2.22. Кривые плотности гамма-распределения

Функция распределения

$$F(x) = \lambda^\alpha / \Gamma(\alpha) \int \chi^{\alpha-1} e^{-\lambda\chi} dx \text{ при } \chi \geq 0; \quad (2.54)$$

$$F(x) = 0 \text{ при } \chi < 0. \quad (2.55)$$

Математическое ожидание и дисперсия соответственно равны:

$$M_x = \alpha / \lambda; D_x = \alpha / \lambda^2 \quad (2.56)$$

При $\alpha < 1$ интенсивность отказов монотонно убывает (что соответствует периоду приработки изделия), при $\alpha > 1$ — возрастает (что характерно для периода изнашивания и старения элементов).

При $\alpha = 1$ гамма-распределение совпадает с экспоненциальным распределением, при $\alpha > 10$ гамма-распределение приближается к нормальному закону. Если α принимает значения произвольных целых положительных чисел, то такое гамма-распределение **называют распределением Эрланга**. Если $\lambda = 1/2$, а значение a кратно $1/2$, то гамма-распределение совпадает с распределением χ^2 .

Пример 1. На испытание было поставлено 1000 однотипных ламп. За первые 3000 ч отказало 80 ламп, а за интервал времени 3000—4000 ч отказало еще 50 ламп. Требуется определить вероятность отказа, вероятность безотказной работы и интенсивность отказов ламп за интервал 3000 ч и за интервал времени 4000 ч.

Решение. Статистически вероятность безотказной работы, вероятность отказа и интенсивность отказов определяются по формулам.

Вероятность безотказной работы за интервал времени 3000 ч

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = \frac{1000 - 80}{1000} = 0,92.$$

Вероятность отказа за интервал времени 3000 ч

$$Q^*(t) = \frac{n(0, t)}{N(0)} = \frac{80}{1000} = 0,08.$$

Интенсивность отказов за интервал времени 3000 ч

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{\Delta t N_{cp}} = \frac{80}{3000 \left(\frac{1000 + 920}{2} \right)} = 0,28 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы за интервал времени 4000 ч

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = \frac{1000 - (80 + 50)}{1000} = 0,87.$$

Вероятность отказа за интервал времени 4000 ч

$$Q^*(t) = \frac{n(0, t)}{N(0)} = \frac{80 + 50}{1000} = 0,13.$$

Интенсивность отказов за интервал времени 4000 ч

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{\Delta t N_{cp}} = \frac{80 + 50}{4000 \left(\frac{1000 + 870}{2} \right)} = 0,35 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Пример 2. Время безотказной работы элемента подчинено нормальному распределению с параметрами $m = 80$ час и $\sigma = 20$ час. Найти вероятность того, что элемент проработает безотказно в течение 60 часов.

Решение. Так как для нормального распределения функция надежности

$$P(t) = 0,5 - \Phi_0 \left(\frac{t - m}{\sigma} \right);$$

$$P(60) = 0,5 - \Phi_0 \left(\frac{60 - 80}{20} \right) = 0,8413.$$

Отметим важное свойство нормального распределения: сумма независимых случайных величин, имеющих нормальное распределение, также распределена по нормальному закону. При этом параметры суммы выражаются через параметры слагаемых, а именно: математическое ожидание суммы равно сумме математических ожиданий, дисперсия суммы равна сумме дисперсий.

На рис. 2.23 представлены графики интенсивности отказов $X(t)$ для следующих параметров нормального распределения:

$m = 200$ час и $\sigma = 100$ час (кривая 1);

$m = 200$ час и $\sigma = 80$ час (кривая 2).

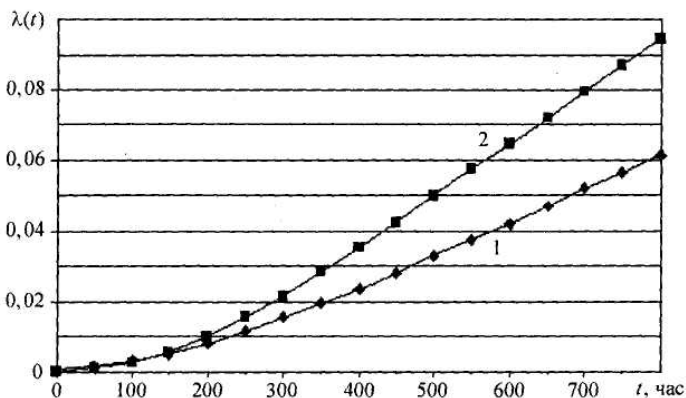


Рис. 2.23. Интенсивность отказов для нормального распределения при разных параметрах

Задания

1. Найти вероятность безотказной работы, вероятность отказа установки, имеющей экспоненциальное распределение, для момента времени $t = 24$ месяца, зная, что среднее время безотказной работы установки – 20 лет.

2. На испытание было поставлено 2000 однотипных ламп. За первые 2000 ч отказало 100 ламп, а за интервал времени 4000–5000 ч – еще 80 ламп. Определить вероятность отказа, вероятность безотказной работы и интенсивность отказов ламп за интервал 4000 ч и за интервал 5000 ч.

3. Время безотказной работы элемента распределено по экспоненциальному закону $\alpha(t) = 0,02\exp(-0,02t)$. Найти вероятность того, что элемент проработает безотказно 100 ч.

4. Время безотказной работы элемента подчинено нормальному распределению с параметрами $m = 60$ час и $\sigma = 10$ час. Найти вероятность того, что элемент проработает безотказно в течение 40 часов.

5. Среднее время безотказной работы системы в период нормальной эксплуатации составляет 100 часов. Вычислить вероятность исправного состояния системы в момент времени $t = 10$ ч.

6. В ремонтную мастерскую по обслуживанию телевизоров поступают заявки со средней плотностью 5 шт. в течение рабочей смены за 10 ч. Считая, что число заявок на любом отрезке времени распределено по закону Пуассона, найти вероятность того, что за 2 ч рабочей смены поступят две заявки.

7. По данным эксплуатации генератора установлено, что наработка на отказ подчиняется экспоненциальному закону с параметром $\lambda = 2 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$. Найти вероятность безотказной работы за время $t = 100$ ч. Определить математическое ожидание наработки на отказ.

8. Определить вероятность безотказной работы в течение $t = 210$ ч подшипника скольжения, если ресурс по износу подчиняется нормальному закону распределения с параметрами $Mt = 4 \cdot 10^4 \text{ ч}$, $\sigma = 10^4 \text{ ч}$.

9. Случайная величина X представляет собой предел текучести стали. Опытные данные показывают, что предел текучести имеет нормальное распределение с параметрами $M = 650$ МПа, $\sigma = 30$ МПа. Найти вероятность того, что полученная плавка стали имеет предел текучести в интервале 600–670 МПа.

10. Случайная величина X распределена по нормальному закону и представляет собой ошибку измерения датчика давления. При измерении датчик имеет систематическую ошибку в сторону завышения на 0,5 МПа, среднее квадратическое отклонение ошибки измерения составляет 0,2 МПа. Найти вероятность того,

что отклонение измеряемого значения от истинного не превзойдет по абсолютной величине 0,7 МПа.

11. Определить вероятность безотказной работы редуктора в течение $t = 103$ ч, если ресурс распределен логарифмически нормально с параметрами $\lg t_0 = 3,6$; $\sigma = 0,3$.

Лабораторная работа 4

Анализ показателей безопасности системы

«человек – машина – среда»

Цель – приобрести навыки анализа надежности систем «человек – машина – среда».

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретический материал лабораторной работы.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–4.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Надежность работы человека определяется как вероятность успешного выполнения им работы или поставленной задачи на заданном этапе функционирования системы в течение заданного интервала времени при определенных требованиях к продолжительности выполнения работы.

Ошибка человека определяется как невыполнение поставленной задачи (или выполнение запрещенного действия), которое может явиться причиной повреждения оборудования или имущества либо нарушения нормального хода запланированных операций.

В реальных условиях в большинстве систем независимо от степени их автоматизации требуется в той или иной мере участие человека.

Можно утверждать, что там, где работает человек, появляются ошибки. Поэтому прогнозирование надежности оборудования без учета надежности работы человека не может дать истинной картины.

Ошибки по вине человека могут возникнуть в случаях:

- когда оператор или какое-либо лицо стремится к достижению ошибочной цели;
- поставленная цель не может быть достигнута из-за неправильных действий оператора;
- оператор бездействует в тот момент, когда его участие необходимо.

Виды ошибок, допускаемых человеком, можно классифицировать следующим образом.

Ошибки проектирования — обусловлены неудовлетворительным качеством проектирования. Например, управляющие устройства и индикаторы могут быть расположены настолько далеко друг от друга, что оператор будет испытывать затруднения при одновременном пользовании ими.

Операторские ошибки — возникают при неправильном выполнении обслуживающим персоналом установленных процедур или в тех случаях, когда правильные процедуры вообще не предусмотрены.

Ошибки изготовления — имеют место на этапе производства вследствие а) неудовлетворительного качества работы, например неправильной сварки, б) неправильного выбора материала, в) изготовления изделия с отклонениями от конструкторской документации.

Ошибки технического обслуживания — возникают в процессе эксплуатации и обычно вызваны некачественным ремонтом оборудования или неправильным монтажом вследствие недостаточной подготовленности обслуживающего персонала, неудовлетворительного оснащения необходимой аппаратурой и инструментами.

Внесенные ошибки — как правило, это ошибки, для которых трудно установить причину их возникновения, т. е. определить, допущены они по вине человека или же связаны с оборудованием.

Ошибки контроля — связаны с ошибочной приемкой как годного элемента или устройства, характеристики которого выходят за пределы допусков, либо с ошибочной отбраковкой годного устройства или элемента с характеристиками в пределах допусков.

Ошибки обращения — возникают вследствие неудовлетворительного хранения изделий или их транспортировки с отклонениями от рекомендаций изготовителя.

Ошибки организации рабочего места — теснота рабочего помещения, повышенная температура, шум, недостаточная освещенность и т. п.

Ошибки управления коллективом — недостаточное стимулирование специалистов, их психологическая несовместимость, не позволяющие достигнуть оптимального качества работы.

Свойство человека ошибаться является функцией его психофизиологического состояния. Интенсивность ошибок во многом определяется параметрами внешней среды, в которой человек работает. Факторы, воздействующие на человека, управляющего потенциально опасной техникой, представлены на рис. 2.24.

Формула безопасности: критическая позиция (I) + строго регламентированный и взвешенный подход (II) + коммуникабельность (III) = безопасность. Будучи внедренной в стереотип поведения оператора, обеспечивает:

- предотвращение (удаление от) аварийной ситуации;
- снижение процента ошибок при управлении аварией.

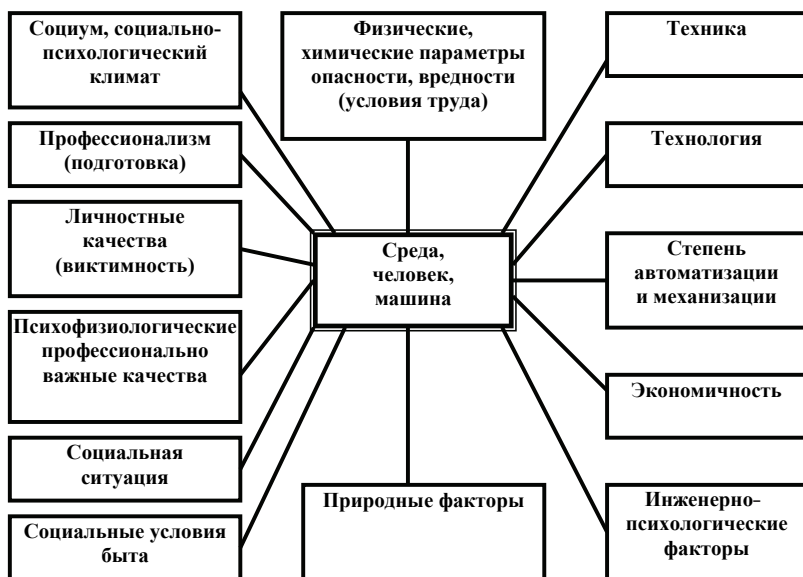


Рис. 2.24. Факторы, воздействующие на человека, управляющего потенциально опасной техникой

Пример 1. При развитии аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» персоналом допущены следующие ошибки:

- ремонтники оставили закрытыми задвижки на линии аварийного питания парогенератора (ПГ);
- произошло непонимание протекающих процессов вследствие отсутствия полной информации, стереотипа мышления и недочетов конструкции. В частности, существенную роль в развитии аварии сыграл импульсный предохранительный клапан (ИПК) на линии от конденсатора давления (КД), который не закрылся после срабатывания.

Аналогичная ситуация сложилась 11 мая 1984 г. на Калининской АЭС, которая, к счастью, не привела к аварии. Возврат на место ИПК КД происходит далеко не всегда, наблюдались случаи не посадки клапана и на других АЭС уже после аварии на «Три-Майл-Айленд». Однако это не породило импульса к исправлению положения. Это пример отсутствия культуры безопасности на атомном предприятии-изготовителе и в проектной организации, использовавшей такой ИПК в проекте.

В возникновении наиболее тяжелой за всю историю атомной энергетики аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) большую негативную роль сыграл оперативный персонал. Известно, что человеческие ошибки совершаются только в условиях, когда люди не могут их не сделать. Исходя из этого представляется важным оценить психологическую и социально-психологическую обстановку на ЧАЭС.

1. ЧАЭС – одна из лучших атомных электростанций. Благоустроенный город Припять. Престижное место работы.

2. Квалификация оперативного персонала на ЧАЭС, и в пятой смене в частности (когда произошла авария), не дает основания для сомнений: образование и практический опыт работы имелись.

3. ЧАЭС – Припять: обособление должностных группировок, внутри которых поддерживались отношения «своих».

4. Подбор и расстановка кадров осуществлялись в соответствии с п. 3 (обособление должностных группировок).

5. Снижение активности жизненной позиции: определяющий мотив поведения – избежать конфликта с руководством (следствие: «Мне приказано – я делаю», т. е. буквальное следование инструкциям; равнодушие к производству; уход в мир личных интересов; «позиция винтика»).

6. Традиция сохранения в тайне информации об аварийных случаях, что исключает возможность обучения персонала и воспитания чувства коллективной ответственности.

7. Внутренняя установка на выполнение задания (плана производства электроэнергии, программы испытаний и т. п.), но не на безопасность.

Следует отметить еще ряд негативных факторов.

1. Работа оператора может быть успешной, если технические характеристики управляемой системы соответствуют возможностям человека (профессиональная подготовка, психофизиологические и психологические характеристики). Это не было обеспечено в данном случае.

2. Управление блоком осуществлялось на основании богатого операторского опыта, знаний физических и теплофизических процессов и интуиции.

Успешный выход из нестандартных ситуаций в прошлом укрепляет уверенность в личных возможностях операторов и способствует потере бдительности у персонала, а иногда порождает и особую «доблесть» риска («Прорвемся, как и в прошлый раз!»).

3. Блочный щит управления был выполнен без учета требований эргономики (количество и важность информации).

Все эти негативные и позитивные обстоятельства реализовались во время аварии. Оценка масштабов аварии, доступная специалистам, не была доведена до сведения жителей города. «Соблюдать порядок, не сеять панику, ждать команд свыше» – вот тон руководящих указаний, продолжавших линию секретности. Пока дети работников АЭС баловались в лужах города, сами работники АЭС ликвидировали аварию.

На развитии опасной ситуации сказывается процесс субъективного восприятия риска. Субъективное восприятие риска – очень интересный и сложный вопрос. В зависимости от того, как люди воспринимают события катастрофического характера, формируется их поведение при различных формах деятельности. У экспертов представление о риске от какой-либо технологии однозначно связано со смертностью от нее, у населения же такой связи нет.

Характерный пример: эксперимент, поставленный сотрудниками Всесоюзного научно-исследовательского института системных исследований (ВНИИСИ), был направлен на выявление особенностей субъективного представления людей о степени риска, связанного с различными видами деятельности. Он предполагал ранжирование испытуемыми тринадцати видов риска. Первое место по степени риска для общества (социального риска) в обобщенной ранжировке заняли стихийные бедствия, второе – АЭС, а последнее – поездки на железнодорожном транспорте и активный отдых (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Ранжировка суждений о риске

Вид риска	Ранжировка риска
Стихийные бедствия	1
АЭС	2
Загрязнение окружающей среды	3
Потребление алкоголя	4
Добыча полезных ископаемых	5
Использование автотранспорта	6
Тепловые электростанции	8
Курение	8
Гидроэлектростанции	8
Полеты на самолетах	10
Рентген в медицине	11
Поездки на железнодорожном транспорте	12
Активный отдых	13

Полученная ранжировка не адекватна реальному положению вещей. Несомненно, ущерб от стихийных бедствий велик и ежегодное число жертв стихийных бедствий оценивается 250–300 тыс. человек. Однако число жертв курения составляет до 2,5 млн человек каждый год, что в восемь раз превышает число жертв, связанных с использованием автотранспорта.

Методология прогнозирования ошибок

Методы прогнозирования частоты ошибок человека основываются на классическом анализе и включают следующие этапы:

- составление перечня основных отказов системы;
- составление перечня действий человека;
- оценивание частоты ошибок человека;
- определение влияния частоты ошибок человека на интенсивность отказов рассматриваемой системы;
- выработка рекомендаций, внесение необходимых изменений в рассматриваемую систему и вычисление новых значений интенсивности отказов.

Одним из основных методов анализа надежности работы человека является построение дерева вероятностей (дерево исходов). При использовании этого метода задается некоторая условная вероятность успешного или ошибочного выполнения человеком каждой важной операции либо вероятность появления соответствующего события. Исход каждого события изображается ветвями дерева вероятностей. Полная вероятность успешного выполнения определенной операции находится суммированием соответствующих вероятностей в конечной точке пути успешных исходов на диаграмме дерева вероятностей. Этот метод с некоторыми уточнениями может учитывать такие факторы, как стресс, вызываемый нехваткой времени; эмоциональная нагрузка; нагрузка, определяемая необходимостью ответных действий, результатами взаимодействий и отказами оборудования.

Следует заметить, что данный метод обеспечивает хорошую наглядность, а связанные с ним математические вычисления просты, что, в свою очередь, снижает вероятность появления вычислительных ошибок. Кроме того, он позволяет специалисту по инженерной психологии легко оценить условную вероятность, которую в противном случае можно получить только с помощью решения сложных вероятностных уравнений.

Пример 2. Оператор выполняет два задания – сначала x , а затем y . При этом он может выполнять их как правильно, так и неправильно. Другими словами, неправильно выполняемые задания – единственные ошибки, которые могут появляться в данной

ситуации. Требуется построить дерево возможных исходов и найти общую вероятность неправильного выполнения задания. Предполагается, что вероятности статистически независимы.

Для решения поставленной задачи воспользуемся деревом возможных исходов, изображенным на рис. 2.25, и введем следующие обозначения:

- P_s – вероятность успешного выполнения задания;
- P_f – вероятность невыполнения задания;
- s – успешное выполнение задания;
- f – невыполнение задания;
- P_x – вероятность успешного выполнения задания x ;
- P_y – вероятность успешного выполнения задания y ;
- $P_{\bar{x}}$ – вероятность невыполнения задания \bar{x} ;
- $P_{\bar{y}}$ – вероятность невыполнения задания \bar{y} .

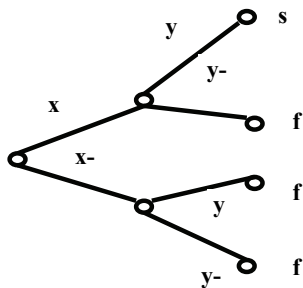


Рис. 2.25. Схема дерева исходов

Согласно рис. 2.25 вероятность успешного выполнения задания равна

$$P_s = P_x P_y. \quad (2.56)$$

Аналогично находится выражение для вероятности невыполнения задания:

$$P_f = P_x \cdot P_{\bar{y}} + P_{\bar{x}} \cdot P_y + P_{\bar{x}} \cdot P_{\bar{y}} = 1 - P_x P_y. \quad (2.57)$$

Из рис. 2.25 следует, что единственным способом успешного выполнения системного задания является выполнение обоих заданий x и y . Именно поэтому вероятность правильного выполнения системного задания определяется как $P_x P_y$.

Для оценки надежности работы операторов технических систем необходимо учитывать следующие факторы:

- качество обучения и практической подготовки;
- наличие письменных инструкций, их качество и возможность неправильного их толкования;

- эргономические показатели рабочих мест;
- степень независимости действий оператора;
- наличие операторов-дублеров;
- психологические нагрузки.

Оценивание частоты ошибок человека следует проводить только после рассмотрения всех этих факторов. Полученные оценки должны затем включаться в процедуру анализа дерева отказов.

Показатели безопасности систем «человек – машина» (СЧМ)

Надежность характеризует **безошибочность (правильность) решения** стоящих перед СЧМ задач. Оценивается вероятностью правильного решения задач, которая, по статистическим данным, определяется соотношением

$$P_{np} = 1 - \frac{m_{om}}{N}, \quad (2.58)$$

где m_{om} и N – соответственно число ошибочно решенных и общее число решаемых задач.

Точность работы оператора – степень отклонения некоторого параметра, измеряемого, устанавливаемого или регулируемого оператором, от своего истинного, заданного или номинального значения. Количественно точность работы оператора оценивается величиной погрешности, с которой оператор измеряет, устанавливает или регулирует данный параметр:

$$\gamma = I_n - I_{on}, \quad (2.59)$$

где I_n – истинное или номинальное значение параметра; I_{on} – фактически измеряемое или регулируемое оператором значение этого параметра.

Не всякая погрешность является ошибкой, до тех пор, пока величина погрешности не выходит за допустимые пределы.

В работе оператора следует различать случайную и систематическую погрешности. **Случайная погрешность** оператора оценивается величиной среднеквадратической погрешности, **систематическая погрешность** – величиной математического ожидания отдельных погрешностей.

Своевременность решения задачи СЧМ определяется вероятностью того, что стоящая перед СЧМ задача будет решена за время, не превышающее допустимое:

$$P_{cv} = P\{T_u \leq T_{don}\} = \int_0^{T_{don}} \varphi(T) dT, \quad (2.60)$$

где $\varphi(T)$ – функция плотности времени решения задачи системой «человек – машина».

Эта вероятность по статистическим данным:

$$P_{св} = 1 - \frac{m_{нс}}{N}, \quad (2.61)$$

где $m_{нс}$ – число несвоевременно решенных СЧМ задач.

В качестве общего показателя надежности используется вероятность правильного (P_{np}) и своевременного ($P_{св}$) решения задачи:

$$P_{счм} = P_{np} P_{св}. \quad (2.62)$$

Безопасность труда человека в СЧМ оценивается вероятностью безопасной работы:

$$P_{\delta m} = 1 - \sum_{i=1}^n P_{воз.i} P_{om.i}, \quad (2.63)$$

где $P_{воз.i}$ – вероятность возникновения опасной или вредной для человека производственной ситуации i -го типа; $P_{om.i}$ – вероятность неправильных действий оператора в i -й ситуации; i – число возможных травмоопасных ситуаций.

Степень автоматизации СЧМ характеризует относительное количество информации, перерабатываемой автоматическими устройствами:

$$K_a = 1 - \frac{H_{он}}{H_{счм}}, \quad (2.64)$$

где $H_{он}$ – количество информации, перерабатываемой оператором; $H_{счм}$ – общее количество информации, циркулирующей в системе «человек – машина».

Экономический показатель характеризует полные затраты на систему «человек – машина». В общем случае эти затраты складываются из затрат на создание (изготовление) системы C_u затрат на подготовку операторов $C_{он}$ и эксплуатационных расходов $C_э$,

$$W_{счм} = E_n (C_u + C_{он}) + C_э, \quad (2.65)$$

где E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных затрат ($C_u + C_{он}$).

Эргономические показатели учитывают совокупность специфических свойств СЧМ и представляют иерархическую структуру, включающую в себя ценностную эргономическую характеристику (эргономичность СЧМ), комплексные (управляемость, обслуживаемость, осваиваемость и обитаемость СЧМ), групповые (социально-психологические, психологические, физиологические, антропометрические, гигиенические) и единичные показатели.

Надежность оператора — свойство качественно выполнять трудовую деятельность в течение определенного времени при заданных условиях.

Ошибки оператора: невыполнение требуемого или выполнение лишнего (несанкционированного) действия, нарушение последовательности выполнения действий, неправильное или несвоевременное выполнение требуемого действия.

В зависимости от последствий ошибки могут быть аварийными и неаварийными.

Надежность оператора характеризуется показателями безошибочности, готовности, восстанавливаемости и своевременности.

Показателем безошибочности является вероятность безошибочной работы. Для типовых, часто повторяющихся операций в качестве показателя безошибочности может использоваться интенсивность ошибок:

$$P_j = \frac{N_j - n_j}{N_j}; \quad \lambda_j = \frac{n_j}{N_j T_j}, \quad (2.66)$$

где P_j — вероятность безошибочного выполнения операций j -го типа; λ_j — интенсивность ошибок j -го вида; N_j , n_j — общее число выполненных операций j -го вида и допущенное при этом число ошибок; T_j — среднее время выполнения операции j -го вида.

Для участка устойчивой работоспособности оператора можно найти вероятность безошибочного выполнения операций:

$$P_{on} = \prod_{j=1}^r P_j^{k_j}, \quad (2.67)$$

где k_j — число выполненных операций j -го вида; r — число различных типов операций ($j = 1, 2, \dots, r$).

Коэффициент готовности оператора представляет собой вероятность включения оператора в работу в любой произвольный момент времени:

$$K_{on} = 1 - \frac{T_0}{T}, \quad (2.68)$$

где T_0 — время, в течение которого оператор по тем или иным причинам не находится на рабочем месте; T — общее время работы оператора.

Показатель восстанавливаемости — возможность самоконтроля оператором своих действий и исправления допущенных ошибок, т. е. представляет вероятность исправления оператором допущенной ошибки:

$$P_{исп} = P_k P_{об} P_u, \quad (2.69)$$

где P_k – вероятность выдачи сигнала системой контроля; $P_{об}$ – вероятность обнаружения оператором сигнала контроля; P_u – вероятность исправления ошибочных действий при повторном выполнении операций.

Основным показателем своевременности является вероятность выполнения задачи в течение времени $\tau < tl$:

$$P_{св} = P\{\tau < t_{л}\} = \int_0^{t_{л}} f(\tau) d\tau, \quad (2.70)$$

где $f(\tau)$ – функция распределения времени решения задачи оператором.

Надежность деятельности оператора не остается величиной постоянной, а меняется с течением времени. Это обусловлено как изменением условий деятельности, так и колебаниями состояния оператора.

Среднее значение вероятности безошибочной работы оператора

$$P_{он} = \sum_{i=1}^m P_i P_{он}, \quad (2.71)$$

где P_i – вероятность наступления i -го состояния СЧМ; $P_{он}$ – условная вероятность безошибочной работы оператора в i -м состоянии; m – число рассматриваемых состояний СЧМ.

Роль инженерной психологии в обеспечении надежности

Конструктор, разрабатывая аппараты, отвечает за обеспечение всех требуемых характеристик, включая надежность. При этом разработка конструкции, выбор формы, цвета, условий эксплуатации, оптимальных условий обслуживания, управления должны вестись с учетом человеческих возможностей и ограничений.

Роль человеческого фактора в снижении надежности очень высока. Частота отказов по вине человека колеблется от 20 до 80%:

$$P_s(t) = P_v(t) P_m(t), \quad (2.72)$$

где P_s – показатель надежности всей системы; P_v – показатель надежности человека; P_m – показатель надежности машины.

Надежность человека при проектировании машины должна учитываться так же, как и надежность машины.

Надежность оператора может быть рассчитана как элемент технической системы путем использования входных и выходных параметров. Поведение человека можно характеризовать комбинацией трех параметров: входного сигнала (S), внутренней реакции (R), отклика на выходе (O).

Упрощенную математическую модель поведения человека представим в виде (рис. 2.26):

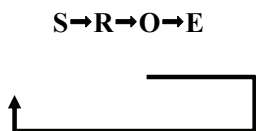


Рис. 2.26. Упрощенная математическая модель поведения человека:
 S — изменение окружающих условий, воспринимаемых оператором (например, загорание сигнальной лампы); R — восприятие и обработка физического сигнала (запоминание, обдумывание и т. д.); O — действие, обусловленное внутренней реакцией человека на сигнал (например, речь, нажатие кнопки); E — изменение в машине (системе), вызванное действием оператора

Сложность заключается в том, что поведение человека определяется действием многих цепей ($S \rightarrow R \rightarrow O$), переплетенных между собой. Человек допускает ошибку, когда какой-либо элемент цепи оказывается неисправным. Например, физические изменения окружающих условий не воспринимаются как сигнал S :

- сигналы неразличимы;
- сигнал принят, но неправильно понят;
- сигнал принят, понят, но правильный отклик неизвестен оператору;
- правильный отклик находится за пределами возможностей человека;
- отклик выполняется неправильно, не в требуемой последовательности.

Применительно к конструированию аппаратуры это означает следующее: чтобы оператор был в состоянии откликнуться соответствующим образом, сигналы должны восприниматься оператором и требовать отклика, который оператор способен произвести. Для четкой работы системы оператор должен получить подтверждение о последствиях отклика по каналам обратной связи. Не имея возможности видеть результаты своей деятельности, оператор не может быть уверен в их правильности, его реакция будет характеризоваться большой изменчивостью.

Для конструктора это означает, что аппаратура должна обеспечивать оператора входными сигналами и сигналами, передаваемыми по каналу обратной связи.

На этапе проектирования производится оценка надежности человека, машины и системы «человек — машина» в целом. В качестве

руководства при выборе конкретного типа органа управления индикаторов и т. д. используются опытные данные по надежности. Каждый орган управления имеет конечное число размерных параметров, каждый из которых связан с оценкой надежности. Различный набор параметров гарантирует разную надежность работы человека. Необходимо учитывать, что надежность устного распоряжения или выполнения записи равна 0,9998. Надежность мыслительных операций (принятия решения) равна 0,999.

Задания

1. Сконструировать ручку управления, обеспечивающую вероятность безотказной эксплуатации $Pэ(t) = 0,994$. Исходные данные приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Исходные данные

Параметр	Значение	P (t)
Длина ручки	152...128	0,9963
Величина перемещения ручки	30...40	0,9975
Сопrotивление управлению	2,3...4 кг	0,9999

2. Рассчитать надежность операции нажатия на кнопку операторов при загорании зеленой лампочки. Исходные данные приведены в табл. 2.4. Расчленим операции на элементы: S – зажигание лампы, R – обдуывание, O – нажатие кнопки.

Таблица 2.4

Исходные данные

№ п/п	Кнопка	P (t)	Лампочка	P (t), ч
1	Диаметр кнопки (миниатюрная)	0,9995	Диаметр лампочки 6,4–12,7	0,9997
2	Один ряд	0,9997	Количество лампочек – 4	0,9975
3	Расстояние между кнопками 10–13 мм	0,9993	Индикация непрерывная	0,9996
4	Отсутствие фиксации	0,9998		

3. Заполнить таблицу, проведя анализ производственной ситуации (ситуацию смоделировать самостоятельно).

Виды ошибок	Содержание ошибок
Ошибки проектирования	
Операторские ошибки	
Ошибки изготовления	
Ошибки технического обслуживания	
Внесенные ошибки	
Ошибки контроля	
Ошибки обращения	
Ошибки организации рабочего места	
Ошибки управления коллективом	

4. Используя методы прогнозирования частоты ошибок человека и показатели безопасности систем «человек – машина» (СЧМ), проанализировать производственную ситуацию (задание выполнить в виде таблицы).

ТЕСТЫ

1. Как называется свойство объекта противостоять возмущению, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей?

- 1) безопасность;
- 2) ремонтпригодность;
- 3) живучесть;
- 4) режимная управляемость.

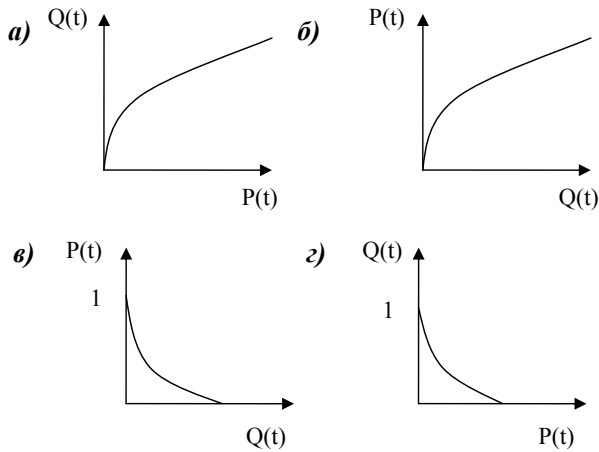
2. Как называется свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания или ремонта?

- 1) устойчивоспособность;
- 2) долговечность;
- 3) ремонтпригодность;
- 4) безотказность.

3. Какого способа соединения элементов не существует?

- 1) смешанное соединение;
- 2) последовательное соединение;
- 3) временное соединение;
- 4) параллельное соединение.

4. На каком из рисунков показана кривая безотказной работы?



5. Как записывается закон распределения надежности?

$$1) P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_1^{\infty} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}} dt ;$$

$$2) Q(t) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} \int_1^{\infty} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}} dt ;$$

$$3) Q(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_1^{\infty} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}} dt ;$$

$$4) P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_1^{\infty} e^{-\frac{(t-T)^2}{\sigma^2}} dt .$$

6. Соотнесите основные понятия надежности:

- 1) объект;
- 2) элемент;
- 3) система;
- 4) отказ.

а) объект, надежность которого изучается вне зависимости от надежности составляющих его частей.

б) совокупность совместно функционирующих элементов, объединенных для выполнения единой задачи.

- в) предмет определенного целевого назначения, рассматриваемый с точки зрения анализа надежности.
- г) событие, заключающееся в нарушении работоспособности.
7. Соотнесите заключающиеся нарушения работоспособности:
- 1) вероятность отказов;
 - 2) интенсивность отказов;
 - 3) вероятность безотказной работы;
 - 4) частота отказов.
- а) условная вероятность отказов после моментов t за единицу времени Δt при условии, что до момента t отказов не было.
- б) вероятность того, что в заданном интервале времени $(0;t)$ система не откажет.
- в) отношение числа отказавших элементов в единицу времени t к первоначальному числу испытываемых элементов при условии, что все элементы восстанавливаются.
- г) вероятность того, что в заданном промежутке времени $(0;t)$ произойдет отказ.
8. Ошибки изготовления
- 1) обусловлены неудовлетворительным качеством проектирования;
 - 2) возникают при неправильном выполнении обслуживающим персоналом установленных процедур или в тех случаях, когда правильные процедуры вообще не предусмотрены;
 - 3) имеют место на этапе производства вследствие неудовлетворительного качества работы.
9. Ошибки технического обслуживания
- 1) возникают в процессе эксплуатации и обычно вызваны некачественным ремонтом оборудования или неправильным монтажом вследствие недостаточной подготовленности обслуживающего персонала, неудовлетворительного оснащения необходимой аппаратурой и инструментами;
 - 2) ошибки, для которых трудно установить причину их возникновения, т. е. определить, возникли они по вине человека или же связаны с оборудованием;
 - 3) связаны с ошибочной приемкой как годного элемента или устройства, характеристики которого выходят за пределы допусков, либо с ошибочной отбраковкой годного устройства или элемента с характеристиками в пределах допусков.
10. Внесенные ошибки
- 1) возникают в процессе эксплуатации и обычно вызваны некачественным ремонтом оборудования или неправильным монтажом вследствие недостаточной подготовленности

обслуживающего персонала, неудовлетворительного оснащения необходимой аппаратурой и инструментами;

2) ошибки, для которых трудно установить причину их возникновения, т. е. определить, возникли они по вине человека или же связаны с оборудованием;

3) связаны с ошибочной приемкой как годного элемента или устройства, характеристики которого выходят за пределы допусков, либо с ошибочной отбраковкой годного устройства или элемента с характеристиками в пределах допусков.

11. Ошибки контроля

1) возникают в процессе эксплуатации и обычно вызваны некачественным ремонтом оборудования или неправильным монтажом вследствие недостаточной подготовленности обслуживающего персонала, неудовлетворительного оснащения необходимой аппаратурой и инструментами;

2) ошибки, для которых трудно установить причину их возникновения, т. е. определить, возникли они по вине человека или же связаны с оборудованием;

3) связаны с ошибочной приемкой как годного элемента или устройства, характеристики которого выходят за пределы допусков, либо с ошибочной отбраковкой годного устройства или элемента с характеристиками в пределах допусков.

12. Ошибки обращения

1) возникают вследствие неудовлетворительного хранения изделий или их транспортировки с отклонениями от рекомендаций изготовителя;

2) теснота рабочего помещения, повышенная температура, шум, недостаточная освещенность и т. п.;

3) недостаточное стимулирование специалистов, их психологическая несовместимость, не позволяющие достигнуть оптимального качества работы.

13. Ошибки организации рабочего места

1) возникают вследствие неудовлетворительного хранения изделий или их транспортировки с отклонениями от рекомендаций изготовителя;

2) теснота рабочего помещения, повышенная температура, шум, недостаточная освещенность и т. п.;

3) недостаточное стимулирование специалистов, их психологическая несовместимость, не позволяющие достигнуть оптимального качества работы.

14. Ошибки управления коллективом

- 1) возникают вследствие неудовлетворительного хранения изделий или их транспортировки с отклонениями от рекомендаций изготовителя;
- 2) теснота рабочего помещения, повышенная температура, шум, недостаточная освещенность и т. п.;
- 3) недостаточное стимулирование специалистов, их психологическая несовместимость, не позволяющие достигнуть оптимального качества работы.

Контрольные вопросы

1. Назовите способы задания законов распределения случайной величины. Сформулируйте основное свойство любого закона распределения случайной величины.
2. Каковы основные сообщённые характеристики (параметры) закона распределения случайной величины?
3. Как называется общая совокупность большого числа однородных изделий (теоретически бесконечная)?
4. Какой величиной оценивается случайная погрешность оператора?
5. В каких случаях применяют гамма-распределение отказов?
6. В чем заключается поканальное резервирование?

Модуль 3

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебные вопросы

- Показатели надежности элементов: показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа. Особенности их применения.
- Основные понятия теории надежности объектов с восстановлением.
- Комплексные показатели надежности: коэффициент готовности, коэффициент технического использования. Статистическая оценка законов распределения в задачах надежности.
- Оптимальное управление эксплуатационными процессами.
- Влияние обслуживания на надежность технической системы.
- Сущность и обоснование метода статистического моделирования.

Изучив данную тему, студент должен:

иметь представление об использовании метода статистического моделирования;

знать:

- основные показатели надежности и методы их определения;
- определение вероятности безотказной работы, интенсивности отказов, средней наработки до отказа;
- понятия теории надежности объектов с восстановлением;
- определение параметра потока отказов;
- методы и средства, обеспечивающие надежность технических систем;

уметь:

- рассчитывать вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднюю наработку до отказа;
- определять комплексные показатели надежности: коэффициент готовности, коэффициент технического использования;
- составлять алгоритм обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности системы;

владеть навыками проведения оценки надежности по результатам эксплуатационных данных или испытаний технических объектов.

Методические рекомендации по изучению темы

При освоении темы необходимо:

- изучить учебный материал по теме «Основные понятия и показатели надежности машин и технических систем»;
- акцентировать внимание на определениях показателей надежности и методах обеспечения надежности сложных систем;
- выполнить задание после теоретической части;
- выполнить тесты по теме;
- ответить на контрольные вопросы.

Лабораторная работа 5

Расчет характеристик изделий восстанавливаемых и невосстанавливаемых технических систем

Цель — получить навыки расчета характеристик изделий восстанавливаемых и невосстанавливаемых технических систем.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретический материал лабораторной работы.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–4.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Критерием надёжности называют признак, по которому оценивают надёжность различных изделий. К числу наиболее широко применяемых критериев надёжности относятся:

- вероятность безотказной работы $P(t)$ или вероятность отказа $Q(t)$ в течение определённого времени t ;
- средняя наработка до первого отказа Tcp ;
- наработка на отказ tcp ;
- частота отказов $a(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- параметр потока отказов $\omega(t)$;
- функция готовности $Kz(t)$;
- коэффициент готовности Kz .

Характеристика надежности — количественное значение критерия надежности конкретного изделия. Выбор количественных характеристик надежности зависит от вида изделия (восстанавливаемое, невосстанавливаемое).

Невосстанавливаемыми называют такие изделия, которые в процессе выполнения своих функций не допускают ремонта. Если происходит отказ такого изделия, то выполняемая операция будет сорвана и ее необходимо начинать вновь в том случае, если возможно устранение отказа. К таким изделиям относятся как изделия однократного действия, так и изделия многократного действия (некоторые системы навигационного комплекса судового оборудования, системы ПВО, системы управления воздушным движением, системы управления химическими, металлургическими и другими производственными процессами и т. д.).

Восстанавливаемыми называют такие изделия, которые в процессе выполнения своих функций допускают ремонт. Если произойдет отказ такого изделия, то он вызовет прекращение функционирования изделия только на период устранения отказа. К таким изделиям относятся: электрические машины, телевизоры, агрегаты питания, станки, автомобили, тепловозы и т. п.

Средняя наработка на отказ восстанавливаемого изделия – это среднее значение времени между соседними отказами.

Для одного изделия **статистическая оценка** средней наработки на отказ будет равна

$$t_{cp} = \sum_{i=1}^n t_i / n, \quad (3.1)$$

где t_i – время исправной работы изделия между $(i - 1)$ -м и i -м отказами; n – число отказов за время t .

Для N наблюдаемых в течение времени t изделий **статистическая оценка** средней наработки на отказ определяется по формуле

$$t_{cp} = \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1} t_{ij} \right) / \sum_{j=1}^N n_j, \quad (3.2)$$

где t_{ij} – время исправной работы j -го изделия между $(i - 1)$ -м и i -м отказами; n_j – количество j -х отказов системы.

Пример 1. В течение некоторого периода времени проводилось наблюдение за работой одного восстанавливаемого изделия. За весь период наблюдения было зарегистрировано 15 отказов. До начала наблюдения изделие проработало 258 часов, к концу наблюдения наработка изделия составила 1233 часа. Требуется определить среднюю наработку на отказ t_{cp} .

Решение. Нарботка изделия за наблюдаемый период равна

$$t_2 - t_1 = 1233 - 258 = 975 \text{ ч.}$$

Принимая $\sum t_i = 975$ часов по формуле (3.1), находим среднюю наработку на отказ (3.2): $t_{cp} = 65$ часов.

Пример 2. Проводилось наблюдение за работой трёх одинаковых восстанавливаемых изделий. За период наблюдения было зафиксировано по первому изделию 6 отказов, по второму – 11 отказов и по третьему – 8 отказов.

Наработка первого изделия составила 181 час, второго – 329 часов и третьего – 245 часов. Требуется определить среднюю наработку изделий на отказ.

Решение. Суммарная наработка трёх изделий

$$t_{\Sigma} = \sum \sum t_{ij} = 181 + 329 + 245 = 755 \text{ ч.}$$

Суммарное количество отказов

$$n_{\Sigma} = \sum n_j = 6 + 11 + 8 = 25 \text{ отказов.}$$

Средняя наработка на отказ по формуле будет равна:

$$t_{cp} = 755/25 = 30,2 \text{ ч.}$$

Пример 3. Система состоит из 5 изделий, причём отказ любого одного из них ведёт к отказу системы. Известно, что первое изделие отказало 34 раза в течение 952 часов работы, второе – 24 раза в течение 960 часов работы, а остальные изделия в течение 210 часов работы отказали 4, 6 и 5 раз соответственно. Требуется определить наработку на отказ системы в целом, если справедлив экспоненциальный закон надёжности для каждого из пяти изделий.

Решение. Воспользуемся соотношением

$$\lambda_c = \sum \lambda_i \text{ и } t_{cp} = 1/\lambda_c.$$

Интенсивность отказов для каждого изделия: $\lambda = \frac{n}{t}$.

$$\lambda_1 = 34/952 = 0,0357 \text{ 1/ч,}$$

$$\lambda_2 = 24/960 = 0,025 \text{ 1/ч, } \lambda_{3,4,5} = (4 + 6 + 5)/210 = 0,0714 \text{ 1/ч.}$$

Интенсивность отказов системы:

$$\lambda_c = \sum \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,4,5} = 0,0357 + 0,025 + 0,0714 = 0,1321 \text{ 1/час.}$$

Средняя наработка на отказ системы:

$$t_{cp} = 7,57 \text{ ч.}$$

Пример 4. При эксплуатации системы было зарегистрировано $n = 40$ отказам. Распределение отказов по группам элементов и время, затраченное на восстановление, приведены в табл. 3.1. Найти величину среднего времени восстановления системы.

Таблица 3.1

Группа элементов	Количество отказов по группе n_i	Вес отказов по группе $m_i = \frac{n_i}{n}$	Время восстановления t_i , мин	Суммарное время восстановления по группе t_a , мин
1	2	3	4	5
ППП	8	0,2	80 59 110 91 45 43 99 73	600
Резисторы и конденсаторы	10	0,25	61 73 91 58 44 112 82 54 91 94	760
Реле, трансформаторы, дроссели	4	0,1	102 98 124 128	452
ЭВП	14	0,35	60 64 56 36 65 44 42 33 32 23	700
Прочие элементы	4	0,1	125 133 115 107	480

Решение. Определяем среднее время восстановления аппаратуры по группам элементов.

Для полупроводниковых приборов

$$t_g = \sum_{i=1}^n t_i / n_i = 600 / 8 = 75 \text{ мин.}$$

Аналогично находим:

- для резисторов и конденсаторов – 76 мин;
- для реле, трансформаторов, дросселей – 113 мин;
- для ЭВП – 50 мин;
- для прочих элементов – 120 мин.

Рассчитываем среднее время восстановления системы по формуле

$$t_{ec} = \sum_{i=1}^m t_{gi} \cdot m_i, \quad (3.3)$$

где t_{gi} – среднее время восстановления элементов i -й группы; m_i – вес отказов по группам элементов.

Подставляя значения данных в формулу, получим

$$t_{ec} = 0,2 \cdot 75 + 0,25 \cdot 76 + 0,1 \cdot 113 + 0,35 \cdot 50 + 0,1 \cdot 120 = 75 \text{ мин.}$$

Пример 5. Изделие имело среднюю наработку на отказ $t_{cp} = 65$ часов и среднее время восстановления $t_g = 1,25$ часа. Требуется определить коэффициент готовности изделия после отказа и восстановления.

Решение. По определению коэффициент готовности изделия будет равен

$$K_T = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_g} = \frac{1}{1 + t_g / t_{cp}} = \frac{1}{1 + 0,019} = 0,98.$$

Задания

1. В течение некоторого времени проводилось наблюдение за работой N_0 экземпляров восстанавливаемых изделий. Каждый из образцов работал t_i часов и наработал n_i отказов. Требуется определить среднюю наработку на отказ по данным наблюдения за работой всех изделий. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.2.

Номер варианта	Исходные данные									
	n_1	t_1 час	n_2	t_2 час	n_3	t_3 час	n_4	t_4 час	n_5	t_5 час
0	1	300	3	600	2	400	—	—	—	—
1	3	90	6	270	4	140	5	230	3	180
2	12	960	15	1112	8	808	7	1490	—	—
3	6	144	5	125	3	80	8	176	5	150
4	6	144	5	125	3	80	—	—	—	—
5	10	1020	26	3120	24	3480	18	2700	—	—
6	18	2700	32	4000	24	3480	16	2080	24	3480
7	3	720	4	1040	2	500	6	1800	—	—
8	1	300	3	600	6	2300	7	2450	—	—
9	3	1650	2	1200	4	2300	—	—	—	—

2. В течение времени Δt проводилось наблюдение за восстанавливаемым изделием и было зафиксировано $n(\Delta t)$ отказов. До начала наблюдения изделие проработало t_1 часов, общее время наработки к концу наблюдения составило t_2 часов. Требуется найти среднюю наработку на отказ. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Номер варианта	Исходные данные		
	t_1 час	t_2 час	$n(\Delta t)$
0	350	1280	15
1	400	1600	3
2	1000	6400	9
3	770	4800	7
4	1200	5558	2
5	300	540	12
6	540	1200	5
7	300	3200	8
8	12	184	16
9	570	2000	27

3. Система состоит из N приборов, имеющих разную надёжность. Известно, что каждый из приборов, проработав вне системы

ti часов, имел ni отказов. Для каждого из приборов справедлив экспоненциальный закон распределения отказов. Найти среднюю наработку на отказ всей системы. Исходные данные для расчёта и ответы приведены в табл. 3.4.

Исходные данные

Таблица 3.4

Номер варианта	Исходные данные											
	N	n_1	t_1 час	n_2	t_2 час	n_3	t_3 час	n_4	t_4 час	n_5	t_5 час	
0	3	9	4800	3	5500	3	1200	—	—	—	—	
1	5	6	256	8	540	10	780	4	250	12	900	
2	3	6	2000	4	1860	3	2160	—	—	—	—	
3	4	12	960	15	1112	8	808	7	1490	—	—	
4	5	3	90	6	270	4	140	5	230	3	180	
5	5	45	600	2	600	4	200	6	200	2	200	
6	3	6	144	5	125	3	80	—	—	—	—	
7	4	3	720	4	1040	2	500	6	1800	—	—	
8	3	3	1650	5	150	10	176	—	—	—	—	
9	4	1	120	2	120	8	90	1	700	—	—	

4а (для вариантов 0 – 4). Система состоит из k групп элементов. В процессе эксплуатации зафиксировано n отказов. Количество отказов в j -й группе равно n_j ; среднее время восстановления элементов j -й группы равно t_j . Требуется вычислить среднее время восстановления системы. Исходные данные для расчёта приведены в табл. 3.5. Изделие имеет среднюю наработку на отказ t_{cp} и среднее время восстановления t_b .

4б (для вариантов 5 – 9). Требуется определить коэффициент готовности изделия. Исходные данные для расчёта приведены в табл. 3.6.

Исходные данные

Таблица 3.5

Номер варианта	Исходные данные											
	k	n	n_1	t_1 мин	n_2	t_2 мин	n_3	t_3 мин	n_4	t_4 мин	n_5	t_5 мин
0	5	12	1	20	4	30	3	16	2	36	2	40
1	5	40	5	15	8	25	12	60	6	40	9	20
2	4	9	2	37	1	480	2	60	4	25	—	—
3	5	18	3	72	5	40	4	36	2	120	4	60
4	5	68	14	18	8	40	27	20	6	30	13	15

Исходные данные

Номер варианта	Исходные данные	
	$t_{\text{ср}}$, час	$t_{\text{в}}$, час
5	230	12
6	556	23
7	556	2,5
8	430	8
9	143	1,7

Лабораторная работа 6**Оценка и контроль надежности технических устройств**

Цель – приобрести навыки оценки надежности технических систем на основе результатов испытаний.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретический материал лабораторной работы.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–4.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Если отказ технического устройства наступает при отказе одного из его элементов, то говорят, что такое устройство имеет *основное соединение* элементов. При расчёте надёжности таких устройств предполагают, что отказ элемента является событием случайным и независимым. Тогда вероятность безотказной работы изделия в течение времени t равна произведению вероятностей безотказной работы его элементов в течение времени t с учётом законов распределения отказов. Основные соотношения для количественных характеристик надежности при различных законах распределения времени до отказа невосстанавливаемых изделий приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Наименование закона распределения	Частота отказов (плотность распределения)	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов	Средняя наработка до первого отказа
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = const$	$\frac{1}{\lambda}$
Релея	$\frac{t}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right)$	$\exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right)$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$\sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}$
Вейбулла	$\lambda_0 k t^{k-1} \times \exp(-\lambda_0 t^k)$	$\exp(-\lambda_0 t^k)$	$\lambda_0 k t^{k-1}$	$\frac{\Gamma(1/k + 1)}{\lambda_0^{1/k}}$
Нормальный	$\frac{1}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)\sigma\sqrt{2\pi}} \times \exp\left[\frac{-(t-T)^2}{2\sigma^2}\right]$	$\frac{F[(T_1-t)/\sigma]}{F(T_1/\sigma)}$	$\frac{\exp\frac{T_1-t}{2\sigma^2}}{\sqrt{2\pi}\sigma F\left[\left(\frac{T_1-t}{\sigma}\right)\right]}$	$T_1 + \left[\sqrt{2\pi} F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)\right] \times \exp\left(\frac{-T_1^2}{2\sigma^2}\right)$

Пример 1. Система состоит из 12600 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Определить вероятность безотказной работы и среднюю наработку до первого отказа в течение $t = 50$ ч.

Решение. В этом случае все элементы данного типа равнонадежны и интенсивность отказов системы будет равна

$$\lambda_{cp} = \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i = \lambda_{cp} N = 0,32 \cdot 10^{-6} \cdot 12600 = 4,032 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч,}$$

тогда вероятность безотказной работы системы в течение 50 часов

$$P(50) = e^{-\lambda_{cp} t} = e^{-4,032 \cdot 10^{-3} \cdot 50} \approx 0,82,$$

а средняя наработка системы до первого отказа равна

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_{cp}} = 1/4,032 \cdot 10^{-3} \approx 250 \text{ ч.}$$

Пример 2. Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Требуется вычислить характеристики надежности элемента $P(t)$, $a(t)$ и T_{cp} , если $t = 500$ ч.

Решение. Используя формулы для $P(t)$, $a(t)$ и T_{cp} , приведенные в табл. 3.7, вычисляем: вероятность безотказной работы

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

$$P(500) = \exp(-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 500) = e^{-0,0125} = 0,9875;$$

частота отказов

$$a(t) = \lambda(t)P(t);$$

$$a(500) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 500) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9875 = 2,469 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч};$$

средняя наработка до первого отказа

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} = 1/2,5 \cdot 10^{-5} = 40000 \text{ ч.}$$

Пример 3. Время работы изделия до отказа подчинено закону распределения Релея. Требуется вычислить количественные характеристики надежности изделия $P(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$, T_{cp} для $t = 500$ ч., если параметр распределения $\sigma = 1000$ ч.

Решение. Используя формулы для $P(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$ и T_{cp} , приведённые в табл. 3.7, вычисляем: вероятность безотказной работы

$$P(500) = \exp(-t^2/2\sigma^2) = \exp(-500^2/2 \cdot 1000^2) = e^{-0,125} = 0,88;$$

частота отказов

$$a(500) = (t/\sigma^2)\exp(-t^2/2\sigma^2) = (500/1000)\exp(-500^2/2 \cdot 1000^2) = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч};$$

интенсивность отказов

$$\lambda(500) = \frac{t}{\sigma^2} = \frac{500}{1000^2} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч};$$

средняя наработка до первого отказа

$$T_{cp} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}}1000 = 1253 \text{ ч.}$$

Пример 4. Время безотказной работы изделия подчиняется закону Вейбулла с параметрами $k = 1,5$ и $\lambda_0 = 10^{-4}$ 1/ч, а время его работы $t = 100$ ч. Требуется вычислить количественные характеристики надёжности изделия.

Решение. Используя формулы для $P(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$ и T_{cp} , приведённые в табл. 3.7, вычисляем: вероятность безотказной работы

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t^k);$$

подставляя значения λ_0 , t и k из условия задачи, получим $P(100) = 0,9$.

Частота отказов определяется по формуле

$$a(t) = \lambda_0 k t^{k-1} \exp(-\lambda_0 k t^{k-1}).$$

Тогда

$$a(100) = 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 100^{1,5-1} \cdot 0,9 = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda(100) = a(100) / P(100) = 1,35 \cdot 10^{-3} / 0,9 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч}.$$

Для вычисления средней наработки до первого отказа находим значение гамма-функции для $x = (1/k) + 1 = (1/1,5) + 1 \approx 1,67$.

Подставляя в формулу для T_{cp} значение гамма-функции $\Gamma(x) = 0,9033$ и параметры распределения λ_0 и k , получим

$$T_{cp} = \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) / \lambda_0^{\frac{1}{k}} = 0,9033 / (10^{-4})^{1/1,5} \approx 418 \text{ ч}.$$

Пример 5. В результате опыта получен следующий вариационный ряд времени исправной работы в часах:

2; 3; 3; 5; 6; 7; 8; 8; 9; 9; 13; 15; 16; 17; 18;

20; 21; 25; 28; 35; 37; 53; 56; 69; 77;

86; 98; 119.

Требуется установить закон распределения времени безотказной работы.

Решение. Проверка соответствия принятого закона распределения отказов осуществляется по критериям согласия, наиболее распространенными из которых являются критерий Пирсона и критерий Колмогорова.

По критерию Пирсона вычисляют вероятность вида

$$P(\chi^2 \leq \Delta \leq \infty) = \int_{\chi^2}^{\infty} k_r(u) du,$$

где Δ – мера расхождения; χ^2 – функция плотности распределения

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i},$$

где n – общее число наблюдаемых изделий; $p_i = n_i / n$ – частость i -го интервала статистического ряда; k – число интервалов статистического ряда

$$k_r(u) = \frac{u^{(r/2-1)} e^{-u/2}}{2^{r/2} \Gamma(r/2)},$$

где $r = k - 1$ – число степеней свободы распределения.

Если вероятность $P(\chi^2 \leq \Delta \leq 0,1) \geq 0,1$, то экспериментальное распределение соответствует теоретическому.

По критерию Колмогорова соответствие теоретического и экспериментального распределений проверяется по выполнению условия

$$D\sqrt{k} \leq 1,$$

где D – наибольшее отклонение теоретической кривой распределения от экспериментальной; k – общее количество экспериментальных точек.

Общее число отказов $\sum n_i = 28$.

Заполняем табл. 3.8.

Таблица 3.8

Статистические данные об отказах

Δt_i , ч	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100–120
$n(\Delta t_i)$	16	5	2	2	2	1
$\lambda(\Delta t_i)$, 1/ч	0,0400	0,0263	0,0167	0,0250	0,0500	–

По данным табл. 3.8 строится гистограмма требуемого показателя надёжности и аппроксимируется кривой, по виду которой ориентировочно устанавливается закон распределения отказов путём сравнения с соответствующими теоретическими кривыми (рис. 3.1).

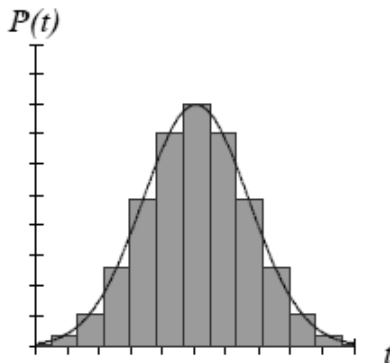


Рис. 3.1. Гистограмма

Находим среднее значение λ_{cp} и наибольшее отклонение D:

$$\lambda_{cp} = \frac{0,0400 + 0,0263 + 0,0167 + 0,0250 + 0,5000}{5} = 0,0316 \frac{1}{ч}.$$

Проверяем экспериментальное распределение на соответствие предполагаемому нормальному распределению по критерию согласия Колмогорова (8)

$$D\sqrt{k} = 0,0184\sqrt{28} = 0,097 < 1.$$

В соответствии с критерием считаем, что закон распределения отказов нормальный.

Задания

1. Изделие состоит из N элементов, средняя интенсивность отказов которых λ_{cp} . Требуется вычислить вероятность безотказной работы в течение t и среднюю наработку до первого отказа. Исходные данные для расчета и ответы приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Варианты	Исходные данные			Ответы	
	N	$\lambda_{cp}, 1/ч$	$t, ч$	$P(t)$	$T_{cp}, ч$
0	5200	$0,16 \cdot 10^{-5}$	200	0,19	120
1	3600	$0,2 \cdot 10^{-5}$	50	0,698	139
2	2500	$0,35 \cdot 10^{-6}$	100	0,916	1143
3	2500	$0,5 \cdot 10^{-5}$	100	0,2865	80
4	1000	$0,5 \cdot 10^{-5}$	100	0,6065	200
5	750	$0,5 \cdot 10^{-5}$	100	0,6873	266
6	500	$0,5 \cdot 10^{-5}$	100	0,7788	400
7	250	$0,5 \cdot 10^{-5}$	100	0,8825	800
8	20500	$2 \cdot 10^{-5}$	2	0,44	2,44
9	1000	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,5	0,7788	2

2а (для вариантов 0–4). Изделие состоит из N групп узлов. Отказы узлов первой группы подчинены экспоненциальному закону с интенсивностью отказов λ . Отказы узлов второй группы – нормальному закону с параметрами T_1 и σ , отказы узлов третьей группы – закону Вейбулла с параметрами λ_0 и k . Требуется определить вероятность безотказной работы изделия в течение времени t . Исходные данные для расчёта и ответы приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Варианты	Исходные данные							Ответы
	N групп	$\lambda \cdot 10^{-4}$, 1/ч	T_1 , ч	σ , ч	$\lambda_0 \cdot 10^{-5}$, 1/ч	k	t	$P(t)$
0	3	1	7200	2000	0,1	1,5	100	0,89
1	2	–	6000	4000	0,3	1,5	1000	0,87
2	2	3,2	–	–	0,2	1,3	500	0,45
3	2	0,93	8000	3000	–	–	2000	0,82
4	3	0,6	4000	4000	0,16	1,4	2400	0,67

2б (для вариантов 5–9). Изделие состоит из N групп узлов. Отказы узлов первой группы подчинены экспоненциальному закону с интенсивностью отказов λ , отказы узлов второй группы – закону Релея с параметром σ и отказы узлов третьей группы – закону Вейбулла с параметрами λ_0 и k . Требуется определить вероятность безотказной работы изделия в течение времени t . Исходные данные для расчета и ответы приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Варианты	Исходные данные						Ответы
	N групп	$\lambda \cdot 10^{-3}$, 1/ч	σ , ч	$\lambda_0 \cdot 10^{-3}$, 1/ч	k	t	$P(t)$
5	3	0,2	1000	0,1	1,5	500	0,7
6	3	0,1	1200	0,03	1,5	1000	0,54
7	2	–	1000	1,6	1,3	500	0,53
8	2	0,09	–	1,3	1,3	120	0,93
9	2	0,06	800	–	–	200	0,96

3. В результате обработки данных по испытаниям и эксплуатации получен вариационный ряд значений времени безотказной работы изделия в часах. Требуется определить закон распределения времени безотказной работы. Исходные данные для расчёта и ответы приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Варианты	Исходные данные	Ответы
	t_i	
1	2	3
0	2; 2; 3; 3; 5; 6; 7; 8; 9; 9; 12; 15; 16; 17; 18; 20; 21; 25; 27; 35; 38; 53; 56; 69; 77; 86; 98; 120	Экспоненциальный

Продолжение табл. 3.12

Варианты	Исходные данные	Ответы
	t_i	
1	2	3
1	60; 100; 150; 170; 240; 300; 430; 650; 1100	Экспоненциальный
2	22; 31; 35; 50; 67; 74; 80; 84; 91; 93; 138; 152; 166; 171	Экспоненциальный
3	82; 89; 116; 124; 132; 197; 431; 1027	Экспоненциальный
4	3; 4; 5; 5; 6; 6; 7; 7; 7; 7; 8; 9; 10; 10; 11; 12; 12; 12; 12; 12; 14; 14; 15; 15; 15; 16; 17; 18; 20; 20; 20; 21; 21; 22; 22; 23; 29; 30; 32; 33; 37; 38; 40; 40; 40; 42; 45; 46; 48; 49; 50; 53; 55; 55; 73; 86; 90; 110; 129	Экспоненциальный
5	19; 28; 28; 32; 36; 36; 50; 51; 71; 124; 126; 138; 163; 231; 246; 260; 300; 302; 320; 341; 380; 384; 468; 477; 603; 807; 895; 920; 937	Экспоненциальный
6	17; 18; 57; 134; 160; 160; 174; 198; 200; 225; 279; 370; 420	Нормальный
7	61; 64; 92; 149; 150; 150; 178; 179; 200; 200; 250; 252; 255; 255; 312; 340; 341; 359; 362; 378; 600; 600	Нормальный
8	699; 724; 794; 799; 810; 935; 997; 1115; 1120; 1174; 1190; 1300; 1353; 1500; 1534; 1573; 1800; 1800; 1900; 2000; 2166; 2278; 2301; 2400; 2444; 2447; 2500; 2700; 2850; 2950	Экспоненциальный
9	200; 232; 328; 368; 393; 404; 421; 457; 483; 511; 527; 540; 544; 572; 598; 605; 619; 633; 660; 681; 736; 791; 942	Вейбулла

4. По данным задачи 3 и вариационному ряду исследуемого времени безотказной работы построить полигон и гистограмму распределения, по виду которых ориентировочно подтвердить закон распределения отказов.

Лабораторная работа 7

Расчет количественных показателей надежности восстанавливаемых объектов

Цель – овладеть навыками проведения расчета количественных показателей надежности для конкретного устройства.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретический материал лабораторной работы.
2. В соответствии с данными выполнить задание 1.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

При расчете надежности сколь угодно сложного изделия (устройства или системы) обычно необходимо определить вероятность его безотказной работы.

Расчет надежности состоит в определении количественных показателей надежности системы по значениям характеристик надежности элементов.

Для расчета надежности необходимо иметь модель надежности системы, которая составляется на основе функциональной (электрической) схемы системы. В качестве моделей при расчете надежности систем наиболее часто применяют структурные логические схемы надежности.

Предполагается, что отказы элементов независимы, элементы и система могут находиться в состоянии двух типов: **работоспособные** или **неработоспособные**.

Перед составлением структурной логической схемы производится анализ функционирования системы и элементов в течение заданной наработки. Определяется содержание термина «безотказная работа системы». Перечисляются и описываются возможные отказы элементов и системы. Оценивается влияние отказа каждого элемента на работоспособность системы.

Элемент, при отказе которого отказывает вся система, считается последовательно соединенным на структурной логической схеме. В этом случае безотказная работа системы имеет место при сохранении работоспособности всеми элементами последовательного соединения, а отказ системы наступает при отказе одного элемента.

Элемент, отказ которого не приводит к отказу системы, включается в параллельное соединение на структурной логической схеме. Безотказная работа системы при параллельно соединенных на структурной логической схеме элементах имеет место при сохранении работоспособности хотя бы одним элементом.

Показатели надежности системы при параллельно соединенных на структурной логической схеме элементах рассчитываются по формулам, соответствующим определенному виду резервирования.

Расчет надежности выполняется согласно требованиям ГОСТ 20237-81 и сводится к расчету вероятности безотказной работы изделия и времени наработки на отказ.

Расчет обычно производится при следующих допущениях.

1. Отказы элементов являются событиями случайными и независимыми.
2. Вероятность безотказной работы элементов изменяется от времени по экспоненциальному закону, т. е. интенсивность отказов не зависит от времени.
3. Учет влияний условий работы производится приближенно.
4. Параметрические отказы отдельно не учитываются.

Для основного функционального соединения элементов в изделии

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) \quad \text{или} \quad P(t) = e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t}. \quad (3.4)$$

Если каждый элемент (узел, блок) имеет n , то:

$$\lambda_i = \sum \lambda_j, \quad (3.5)$$

где λ_j — интенсивность отказов отдельного компонента, следовательно:

$$P(t) = e^{-t \left[\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j \right) \right]}. \quad (3.6)$$

Учет влияний условий эксплуатации изделия в ориентировочных расчетах обычно производится с помощью поправочного коэффициента K_λ .

Величина интенсивности отказов компонента:

$$\lambda_j = \lambda_{j0} \cdot K_\lambda; \quad (3.7)$$

$$K_\lambda = K_y \cdot K_i \cdot K_y, \quad (3.8)$$

где λ_{j0} — интенсивность отказов при лабораторных условиях работы; K_y — эксплуатационный коэффициент для пересчета интенсивностей отказа групп или типов элементов от режимов испытаний к условиям эксплуатации; K_n — коэффициент нагрузки; K_y — коэффициент расчета надежности, связанный с постоянным усовершенствованием технологии.

Время наработки на отказ рассчитывается по формуле

$$t_{cp} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j \right)}. \quad (3.9)$$

Значения поправочных коэффициентов и интенсивностей отказа для различных схмотехнических элементов приведены в табл. 3.14.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Пользуясь принципиальной электрической схемой (рис. 3.2) и приложенной к ней спецификацией (табл. 3.15), внести в графу «Наименование элементов» табл. 3.13 все входящие в устройство элементы (резисторы, конденсаторы, микросхемы, реле и т. д.).

1.1. Схмотехнические элементы. Постоянные резисторы типа МЛТ, С2-29 и переменные резисторы типа СПЗ-5 следует учитывать отдельно, поскольку они имеют существенно различные интенсивности отказов, также следует отдельно учитывать конденсаторы керамические типа КМ, КН, электролитические типа К56-10 (20, 50) и бумажные.

1.2. Контакты. Одним из факторов возможных отказов являются контакты соединительного разъема. Разъемы в электрических схемах обычно обозначаются индексом X_1-X_N – вилка печатная. Иногда в вилке печатной задействованы не все контакты, в таком случае графа «цепь» в изображении вилки остается пустой – эти контакты не следует учитывать.

1.3. Пайки. Пайка является одним из источников отказов вследствие потери контакта. Количество паек подсчитывается следующим образом: конденсаторы, резисторы, диоды имеют две точки пайки; транзисторы – три, микросхемы в зависимости от типа – 14, 16 и более, реле – 4, 5 и более в зависимости от количества контактных групп (штырь является пайкой). К общему количеству следует добавить еще 30%.

1.4. Надежность реле состоит из надежности катушек и магнитоуправляемых контактов, поэтому их учитывают отдельно. Исключение составляют реле типа РЭС, РПС, которые герметизированы (интенсивность их отказов указана в табл. 3.14).

2. Значения интенсивностей отказа и поправочные коэффициенты для всех элементов схемы следует взять из табл. 3.14.

3. Суммарную интенсивность отказов, вероятность безотказной работы за 2000 часов и время наработки на отказ рассчитать по формулам.

4. Дать оценку полученным количественным характеристикам надежности для данного устройства.

Таблица 3.13

Наименование элементов

Наименование элемента	Количество n	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$	K_{Σ}	K_H	K_Y	\hat{E}_{λ}	$\sum_{i=1}^n \lambda_{0i} K_{\lambda} \cdot 10^{-6}$
1	2	3	4	5	6	7	8

Таблица 3.14

Интенсивности отказов электрических элементов

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$	K_{Σ}	K_H	K_Y
Резистор МЛТ (С2-29)	0,04	0,3	0,5	0,7
Резистор СП (переменный)	0,23	0,3	0,5	0,7
Конденсатор керамический	0,015	0,3	0,5	0,7
Конденсатор электролитический	0,4	0,3	0,5	0,7
Конденсатор бумажный	0,05	0,3	0,5	0,7
Диод полупроводниковый (КД522)	0,09	0,3	0,1	0,7
Светодиод	0,2	0,3	0,5	0,7
Транзистор кремниевый малой мощности (серия 300)	0,4	0,2	0,5	0,7
Транзистор средней мощности (серия 500)	1,06	0,2	0,5	0,7
Транзистор большой мощности (серия 1000)	1,73	0,2	0,5	0,7
Оптрон	0,44	0,3	0,5	0,7
Микросхема (серии 155, 555, 176, 561)	0,05	—	0,5	0,7
Микросхема (серии 554, ...)	0,3	—	0,5	0,7
Реле типа РЭС 55	0,8	0,3	0,5	0,7
Трансформатор	0,74	0,8	0,7	0,7
Дроссель	0,44	0,6	0,5	0,7
Стабилитрон	0,075	0,3	0,5	0,7

Продолжение табл. 3.14

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$	$Kэ$	$Kн$	$Kу$
Переключатель малогабаритный	0,8	—	—	—
Реле (магнитоуправляемые контакты)	0,8	—	—	—
Лампа накаливания	0,64	0,5	0,7	0,7
Катушка индуктивности	0,02	0,7	0,5	0,7
Вставка плавкая	0,8	—	—	—
Контакт	0,01	—	—	—
Пайка	0,005	—	—	—
Зажим	0,0005	—	—	—
Предохранитель плавкий	0,5	—	—	—

Таблица 3.15

Спецификация элементов

Обозначение	Наименование	Количество
V_1, V_2	Диод	2
V_3	Стабилитрон	1
V_4	Диод	1
V_5	Стабилитрон	1
V_6	Диод	1
V_8	Диод светоизлучающий	1
V_9, V_{10}	Диод	2
V_{11}, V_{12}	Диод	2
R_1, R_2	Резистор	2
K_1, K_2, K_3	Катушка	3
K_4	Реле	1
K_5	Реле	1
S_1, S_2, S_3	Контакт магнитоуправляемый	3
S_4, S_5	Переключатель	2
S_6	Переключатель	1
X_1	Вилка	1
V_7	Диод светоизлучающий	1

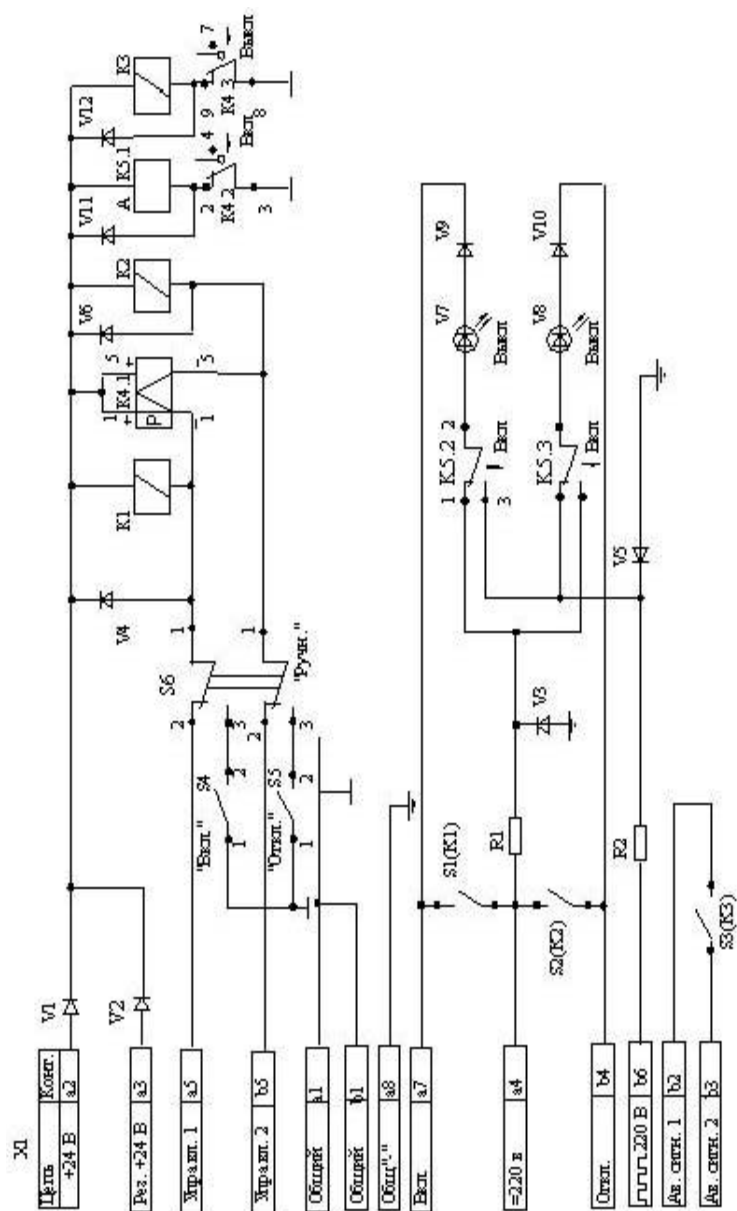


Рис 3.2. Принципиальная электрическая схема

Лабораторная работа 8

Расчет показателей надежности невосстанавливаемой системы с постоянными во времени интенсивностями отказов элементов

Цель – приобрести практические навыки проведения анализа надежности **невосстанавливаемых** технических систем.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретический материал лабораторной работы.
2. В соответствии с данными выполнить задание 1.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Надежность объекта оценивается не только в процессе непосредственной эксплуатации, но и во время хранения, транспортирования и ремонтов. Поэтому надежность является сложным свойством и состоит из сочетания следующих показателей: **безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.**

Основная количественная характеристика надежности элементов – интенсивность отказов $\lambda(t)$. Статистически интенсивность отказов определяется по формуле, μ^{-1}

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{(N_{cp} \cdot \Delta t)}, \quad (3.10)$$

где N_{cp} – среднее число элементов, работоспособных в интервал времени Δt ; $n(\Delta t)$ – количество отказавших элементов за период времени Δt ; Δt – рассматриваемый интервал времени в часах.

В период нормальной эксплуатации устройств (исключающей время приработки и старения) интенсивность отказов является постоянной величиной. В этом случае вероятность безотказной работы $P(t)$ определяется по формуле

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (3.11)$$

Вероятность отказа $Q(t)$ – величина, противоположная вероятности безотказной работы, поэтому

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (3.12)$$

Среднее время безотказной работы (средняя наработка на отказ), μ

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.13)$$

Плотность вероятности отказа системы (ψ^{-1})

$$f_c(t) = \frac{-dP(t)}{dt} = \lambda \cdot e^{-\lambda t}. \quad (3.14)$$

Когда происходит отказ, и объект теряет свою работоспособность, возможны две ситуации. Первая — объект не ремонтируют и больше не используют по назначению. Такой объект называется **невосстанавливаемым**. Он работает только до первого отказа. Данная стратегия использования объекта применяется, если восстановление его технически невозможно или экономически невыгодно. Вторая ситуация — выполняется ремонт объекта, который снова используется по назначению. Такой объект называется **восстанавливаемым**. Большинство систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи являются восстанавливаемыми, обслуживаемыми системами.

Для восстанавливаемых систем важнейшими показателями надежности являются среднее время восстановления $T_{\bar{a}}$, а также коэффициент готовности $K_{\bar{a}}$ (вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени), который определяется по формуле

$$K_e = \frac{T_{cp}}{(T_{cp} + T_e)}. \quad (3.15)$$

Понятие надежности тесно связано с понятием отказа. По характеру возникновения выделяют отказы внезапные, постепенные и перемежающиеся.

Внезапные отказы возникают в результате скачкообразного изменения значений параметров объекта. Их трудно предсказать и можно ожидать только с определенной степенью вероятности.

Постепенные отказы возникают в результате постепенного изменения значений параметров объекта в результате его старения или износа. Постепенные отказы можно прогнозировать.

Третьим видом отказа является **перемежающийся** отказ — многократно возникающий самоустраняющийся отказ объекта одного и того же характера. Сбои связаны с кратковременным действием температурных изменений, внешних электромагнитных влияний, колебаний питающих напряжений и т. д. Причины сбоев труднее всего обнаружить из-за кратковременности их действия.

Структура исследуемых объектов может быть сложной и ее стараются преобразовать к виду, более удобному для расчетов, используя, в частности, разложение сложной структуры по «ключевым» элементам. Сущность метода заключается в замене сложной

структуры двумя более простыми, сумма вероятностей работоспособных состояний которых равна вероятности работоспособного состояния исходной структуры. В основу метода положена формула разложения логического уравнения работоспособности (или вытекающая из нее формула вероятности полного события).

Правило разложения

1. В исходной схеме выбирается элемент с наибольшим количеством связей — элемент разложения x .
2. В месте элемента x делается замыкание, получается первая структура.
3. В месте расположения элемента x делается обрыв в исходной структуре. Получается вторая структура.
4. Вероятность работоспособного состояния первой структуры умножается на вероятность безотказной работы элемента x . Получается первая составляющая P_1 вероятности работоспособного состояния исходной схемы.
5. Вероятность работоспособного состояния второй структуры умножается на вероятность отказа элемента x . Получается вторая составляющая P_2 вероятности работоспособного состояния исходной схемы.
6. Суммируя составляющие P_1 и P_2 , получаем вероятность работоспособного состояния исходной структуры. Разложение можно делать многократно.

Пример 1. Расчет показателей надежности невосстанавливаемой системы с постоянными во времени интенсивностями отказов элементов

Исходные данные

1. Структурная схема системы (рис. 3.3).

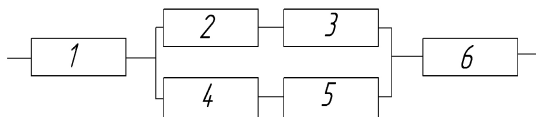


Рис. 3.3. Структурная схема системы

2. Интенсивность отказов элементов системы за время t .

Таблица 3.16

Исходные данные

№ элемента	1	2	3	4	5	6
$\lambda \cdot 10^{-3}, \text{ч}^{-1}$	1,2	2,2	3,3	4,5	2,7	0,9

$$t = 120 \text{ ч}$$

Определить:

1. Вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ за заданное время t .

2. Плотность вероятности отказа системы $f_c(t)$ в момент времени t .

3. Вероятность появления отказа $Q_c(t)$ за заданное время t .

Решение. На начальном этапе расчетов примем $P(t) = P$. Так как элементы P_2 и P_3 соединены последовательно, то обобщенное выражение вероятности их безотказной работы имеет вид:

$$P_{23} = P_2 \cdot P_3. \quad (3.16)$$

Элементы P_4 и P_5 также соединены последовательно, а значит, обобщенное выражение вероятности их безотказной работы будет:

$$P_{45} = P_4 \cdot P_5. \quad (3.17)$$

Обобщенное выражение вероятности безотказной работы для элементов $P_2 - P_5$ принимает вид:

$$P_{01} = 1 - (1 - P_{23})(1 - P_{45}) = P_{45} + P_{23} - P_{45} \cdot P_{23}. \quad (3.18)$$

В результате преобразований получим следующую обобщенную структурную схему системы:

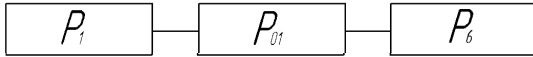


Рис. 3.4. Обобщенная структурная схема системы

Вероятность безотказной работы системы $P_c = P_{\bar{n}}(t)$ будет:

$$P_c = P_1 \cdot P_{01} \cdot P_6 = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_6 + P_1 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \quad (3.19)$$

Так как $P = P(t) = e^{-\lambda t}$, то $P_{\bar{n}}(t)$ принимает следующий вид:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_6 t} + e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_4 t} \cdot e^{-\lambda_5 t} - e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_4 t} \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot e^{-\lambda_6 t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t}. \quad (3.20)$$

Выражение плотности вероятности отказа $f_{\bar{n}}(t)$, с учетом

$f(t) = \frac{-dP(t)}{dt} = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$, имеет следующий вид:

$$f_c(t) = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_6) \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_6)t} + (\lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6) \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6) \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t}. \quad (3.21)$$

Выражение определения вероятности появления отказа $Q_c(t)$:

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t). \quad (3.22)$$

Подставив исходные данные в выражения, получим

1. Вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ за заданное время t : $P_c(t) = 0,56$.

2. Плотность вероятности отказа системы $f_c(t)$ в момент времени t : $f_c(t) = 3,6 \cdot 10^{-3}, \text{ч}^{-1}$.

3. Вероятность появления отказа $Q_c(t)$ за заданное время t : $Q_c(t) = 0,44$.

Пример 2. Расчет показателей надежности невосстанавливаемой системы с постоянными во времени интенсивностями отказов элементов.

Исходные данные

1. Структурная схема системы

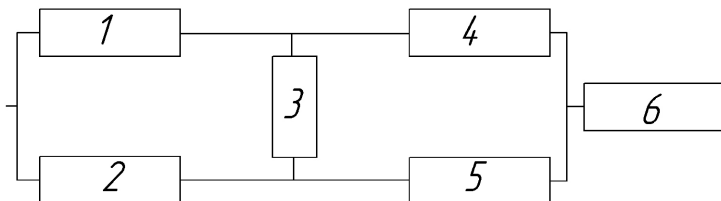


Рис. 3.5. Структурная схема системы

2. Интенсивность отказов элементов системы за время t .

Таблица 3.17

Исходные данные

№ элемента	1	2	3	4	5	6
$\lambda \cdot 10^{-3}, \text{ч}^{-1}$	1,2	2,3	3,0	2,8	2,8	0,3

$t = 120 \text{ ч}$

Определить:

1. Вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ за заданное время t .

2. Среднюю наработку до отказа T_0 .

3. Частоту отказов $f_c(t)$.

4. Интенсивность отказа системы λ_c .

Решение

1. Для нахождения вероятности безотказной работы системы используем метод разложения структуры относительно базового элемента. Метод основывается на теореме о сумме вероятностей несовместимых событий.

В качестве базового элемента выберем 3-й элемент. В соответствии с теоремой имеем два несовместимых события.

1. Базовый элемент находится в работоспособном состоянии, т. е. $P_3 = 1$, и его заменяем перемычкой. Тогда структурная схема системы принимает вид (рис. 3.6):

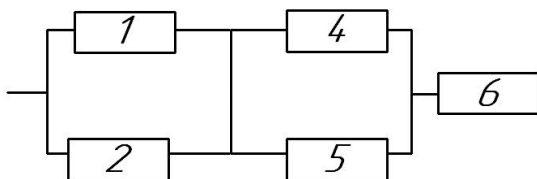


Рис. 3.6. Структурная схема системы

Для данной системы вероятность безотказной работы $P_{c_1}(t)$ будет:

$$P_{c_1} = [1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2)] \cdot [1 - (1 - P_4)(1 - P_5)] \cdot P_6 = \quad (3.23)$$

$$= [P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2] \cdot [P_4 + P_5 - P_4 \cdot P_5] \cdot P_6.$$

2. Базовый элемент находится в состоянии отказа, т. е. $P_3 = 0$, и его заменяем разрывом. Тогда структурная схема системы принимает вид (рис. 3.7):

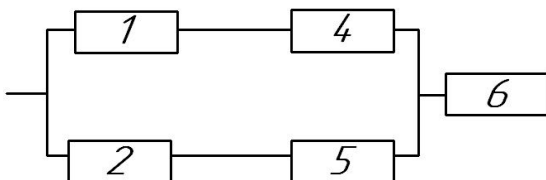


Рис. 3.7. Структурная схема системы

Для данной системы вероятность безотказной работы $P_{c_2}(t)$ будет:

$$P_{c_2} = [1 - (1 - P_1 \cdot P_4)(1 - P_5 \cdot P_2)] \cdot P_6 = P_1 \cdot P_4 \cdot P_6 + P_2 \cdot P_5 \cdot P_6 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6. \quad (3.24)$$

Вероятность безотказной работы исходной системы определится по формуле

$$P_{c_1}(t) = P_{\bar{\sigma}_3} \cdot P_{c_1/P_{\bar{\sigma}_3=1}} + Q_{\bar{\sigma}_3} \cdot P_{c_2/Q_{\bar{\sigma}_3=1}}, \quad (3.25)$$

где $P_{\bar{\sigma}_3}$ – вероятность безотказной работы базового элемента; $Q_{\bar{\sigma}_3}$ – вероятность отказа базового элемента; $P_{c_1/P_{\bar{\sigma}_3=1}}$ – вероятность безотказной работы первой вспомогательной структуры; $P_{c_2/Q_{\bar{\sigma}_3=1}}$ – вероятность безотказной работы второй вспомогательной структуры.

Так как в качестве базового элемента принят 3-й элемент и $Q(t) = 1 - P(t)$, имеем:

$$P_c(t) = P_3 \cdot P_{c_1} + (1 - P_3) \cdot P_{c_2} = [P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2] \cdot [P_4 + P_5 - P_4 \cdot P_5] \cdot P_6 \cdot P_3 + (1 - P_3) \cdot (P_1 \cdot P_4 \cdot P_6 + P_2 \cdot P_5 \cdot P_6 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_6 \cdot P_4 \cdot P_5) \quad (3.26)$$

Подставив исходные данные, получим: $P_c(t) = \frac{99}{118}$.

2. Определим среднюю наработку до отказа, используя выражение

$$T_0 = \int P_c(t) dt.$$

Так как $P(t) = e^{-\lambda t}$, то $T = \frac{1}{\lambda}$. В результате, подставив исходные данные, получим:

$$T_{cp} = 683,334, \text{ ч.}$$

3. Интенсивность отказов системы: $\lambda_c = \frac{1}{T}$.
Подставив исходные данные, получим:

$$\lambda_c = 1,463 \cdot 10^{-3}, \text{ ч}^{-1}.$$

4. Частота отказов системы:

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

Подставив исходные данные, получим:

$$f_c(t) = 1,228 \cdot 10^{-3}, \text{ ч}^{-1}.$$

Задания

1. Провести расчет показателей надежности невосстанавливаемой системы с постоянными во времени интенсивностями отказов элементов.

Исходные данные

1. Структурная схема системы (рис. 3.8–3.15).

Таблица 3.18

Исходные данные

Шифр	Номер рисунка	Шифр	Номер рисунка
$0 \leq N \leq 12$	рис. 3.8	$52 \leq N \leq 64$	рис. 3.12
$13 \leq N \leq 25$	рис. 3.9	$65 \leq N \leq 76$	рис. 3.13
$26 \leq N \leq 38$	рис. 3.10	$77 \leq N \leq 88$	рис. 3.14
$39 \leq N \leq 51$	рис. 3.11	$89 \leq N \leq 99$	рис. 3.15

где N – две последние цифры шифра.

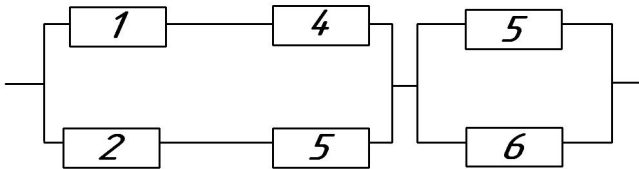


Рис. 3.8. Структурная схема системы

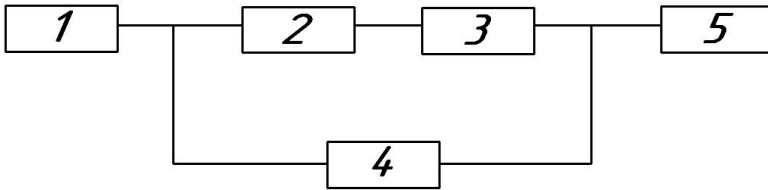


Рис. 3.9. Структурная схема системы

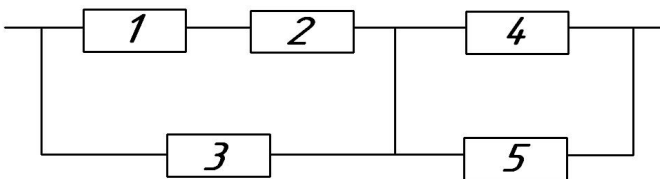


Рис. 3.10. Структурная схема системы

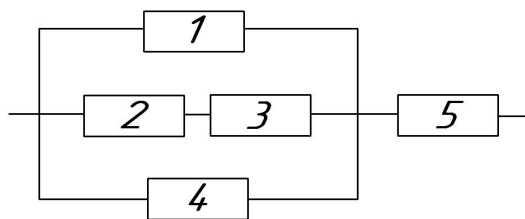


Рис. 3.11. Структурная схема системы

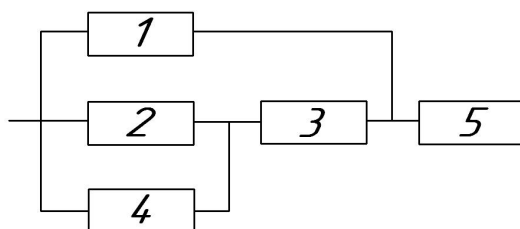


Рис. 3.12. Структурная схема системы

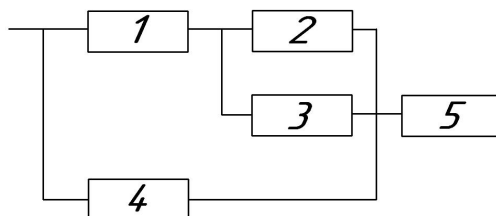


Рис. 3.13. Структурная схема системы

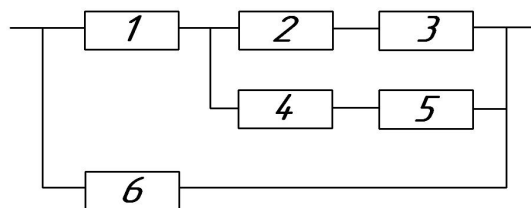


Рис. 3.14. Структурная схема системы

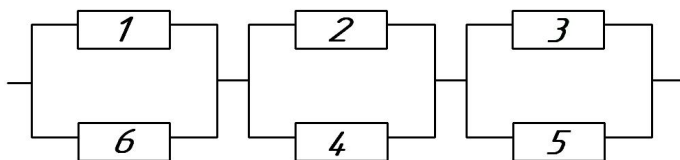


Рис. 3.15. Структурная схема системы

2. Интенсивность отказа i -го элемента определяется по формуле

$$\lambda_i = \left(0,1 \cdot i + \frac{N}{100} \right) \cdot 10^{-3}, \text{ ч}^{-1},$$

где i – порядковый номер элемента; N – две последние цифры шифра.

3. Время работы системы, t :

$$t = 90 + N, \text{ ч},$$

где N – две последние цифры шифра.

Для выбранной структурной схемы системы, интенсивности отказов элементов λ которой известны, определить:

1. Вероятность безотказной работы системы $P_{\bar{n}}(t)$ за заданное время t .
2. Плотность вероятности отказа системы $f_{\bar{n}}(t)$ в момент времени t .
3. Вероятность появления отказа $Q_{\bar{n}}(t)$ за заданное время t .

Практическое занятие 1

Анализ надежности систем и их элементов по данным эксплуатации

Цель – освоить методику анализа надежности технических систем по эксплуатационным характеристикам.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть практического задания.
2. В соответствии с данными выполнить задание 1.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

1. Описание технического объекта как системы

На рис. 3.16 приведена системная пентада, в соответствии с которой необходимо осуществлять анализ и описание различных

по назначению систем. Под системой будем понимать любой объект, процесс или документ, имеющий законченную при данном уровне рассмотрения целостность.

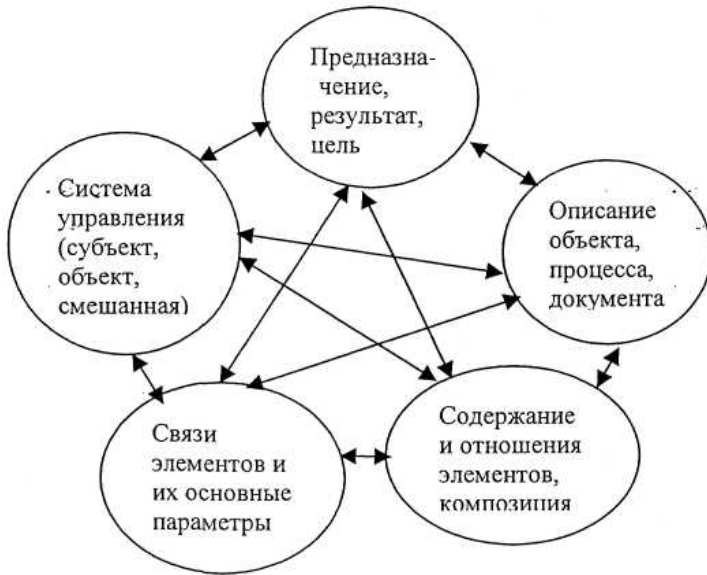


Рис. 3.16. Системная пентада

Начинать анализ необходимо с описания предназначения системы, ее цели или результата. Описание должно быть точным, так как оно определяет структуру системы. Сколько целей, сколько результатов, сколько предназначений — столько и структур.

Цель имеют только саморазвивающиеся и самоорганизующиеся системы. К ним относятся все социальные и человеко-машинные системы, а также практически все биологические системы. Например, самолет имеет предназначение, а летчик с самолетом — уже цель. Если в качестве объекта исследования выступает процесс, то следует определить его результат, а у документа есть также предназначение.

На этом этапе выявляются главные показатели назначения. Следует помнить, что любой технический объект имеет главные, основные и вспомогательные параметры.

Определившись с первым элементом системной пентады, необходимо описать объект исследования, его характерные и отличительные особенности, связь с внешней средой, параметры качества, предъявляемые к этому объекту, и др.

При определении содержания объекта необходимо прежде всего осуществить его функциональное описание с подробным обозначением необходимых элементов для реализации каждой функции. В результате этого описания будет полный набор элементов, в том числе и повторяющихся, что требует определенной их унификации. В ряде случаев может потребоваться и приведение однородных элементов с разными потенциальными свойствами к одному, но реализующему эти свойства. По сути, это предварительное проектирование объекта.

Далее необходимо осуществить морфологическое описание с изображением отношения элементов (сборочных единиц объекта) системы и в виде дерева, определиться с композицией элементов, которая может быть объемной или плоской.

Выяснив иерархию элементов, необходимо подобрать связи между ними. Связи бывают механическими, электрическими, химическими и т. д. Механические связи имеют обширную классификацию — от фрикционных до специальных. Эти связи подробно изучаются в дисциплине «Детали машин».

Заканчивается описание объекта анализом системы управления. Различают объектные, субъектные и субъектно-объектные системы управления.

Определив тип управления, осуществляют информационное описание системы, то есть описание движения потоков информации от элемента к элементу, включая движение материи или энергии. Наличие, например, материального ресурса в данном элементе приводит его в действие.

2. Определение кода изделия по общепромышленному классификатору

Любой объект, используемый в хозяйственной деятельности общества, имеет код, определяемый по Общероссийскому классификатору продукции (ОКП), где достаточно подробно указываются класс, группа и подгруппа объекта. Данный код является основой для ведения технико-экономической информации.

Метод нахождения кода ОКП в Интернете:

1. В Интернете наберите адрес: <http://www.extech.ru>. Далее зайдите в раздел «Библиотека», затем в «Справочники и классификаторы».
2. Найдите заголовок «Рубрикаторы ГРНТИ» (зайдите туда).
3. В поиске «Найти» напишите: «ОКП».
4. На экране выдается список всех найденных файлов.
5. В разделе «Справочник ОКП» в поиске «Найти» напишите, какой класс нужно найти. Например, при ключевом слове «Инструмент» (класс 39) выдается все, что найдено по этому классу.

3. Определение показателей качества технического объекта

Показатели качества объекта определяются отраслевыми нормативами и требованиями ГОСТ 4.93-86 – Система показателей качества продукции. По соответствующему стандарту находятся основные показатели качества и заносятся в таблицу показателей качества продукции.

Средний срок службы T_{cl} технического объекта (лет) может быть установлен в результате испытаний или назначен. Назначенный срок службы определяется нормативными государственными документами, в частности, сроком амортизационных отчислений. Для уникальных объектов он устанавливается особо и фиксируется в ТУ (технических условиях) на изделие. Для металлорежущих станков и станочных комплексов установлен $T_{cl} = 5-12$ лет, для станочных приспособлений – $T_{cl} = 2-4$ года, бытовой техники – $T_{cl} = 5-6$ лет, легковых автомобилей $T_{cl} = 6-10$ лет, особо сложных технических систем, например морских судов, орбитальных станций, – $T_{cl} = 15$ лет

По истечении этого срока решается вопрос о возможности дальнейшей эксплуатации технического объекта. Попутно следует отметить, что в международной практике существует правило: если судно эксплуатируется более 15 лет, при заходе в порт платят повышенную ставку за стоянку.

Срок службы назначенный – средняя календарная продолжительность эксплуатации объекта от начала эксплуатации (или ее возобновления после ремонта) до перехода в предельное состояние, назначенная в соответствии с действующими нормативами на срок службы.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала эксплуатации (или ее возобновления после ремонта) до перехода в предельное состояние.

Предельное состояние – это такое состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или экономически нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или экономически нецелесообразно.

Средний ресурс T_p измеряется, как правило, в единицах осуществляемой работы технического объекта за средний срок службы или времени. Единицами измерения среднего ресурса могут служить, например, станкочасы, объемы выполненных работ, пробег в км и т. д.

Безотказность – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого интервала времени. *Отказ* – событие, заключающееся в полной или частичной утрате изделием его работоспособности.

В табл. 3.19 приведена номенклатура показателей безотказности.

Табл. 3.19

Показатели безотказности

№ п/п	Наименование показателя	Условное обозначение
1	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
2	Интенсивность отказов	$X(t)$
3	Установленная безотказная наработка	T_y
4	Средняя наработка на отказ	T_o
5	Средняя наработка до отказа	T_{cp}
6	Параметр потока отказов	$w(t)$
7	Гамма-процентная наработка до отказа	T_γ

Рассмотрим наиболее употребляющиеся в практике показатели безотказности.

Средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки от начала эксплуатации до отказа невосстанавливаемого изделия. Под *наработкой* понимается продолжительность или объем выполненной объектом работы.

Средняя наработка на отказ — отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Интенсивность отказов — показатель надежности невосстанавливаемых объектов, равный отношению среднего числа отказавших в единицу времени (или наработки в других единицах) объектов к числу объектов, оставшихся работоспособными. Этот показатель более чувствителен, чем вероятность безотказной работы, особенно для изделий высокой надежности.

Параметр потока отказов — показатель надежности восстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказов объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки (соответствует интенсивности отказов для неремонтируемых изделий, но включает повторные отказы).

Гамма-процентная наработка до отказа — наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Условия эксплуатации технического объекта.

Обычно задаются следующие исходные данные:

- срок службы T_{cl} (лет);
- гамма-процентный ресурс T_{py} в процентах;
- условия эксплуатации – степень нагружения; точность изготовления объекта, режим работы; коэффициент использования в смену.

Все показатели качества заносятся в таблицу.

Таблица 3.20

Показатели качества продукции (начало таблицы)

Наименование показателей качества	Обозначение показателей качества	Значение показателей качества	Наименование характеризующего свойства
1. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА			
2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ			
1) Установленная наработка на отказ, ч 2) Установленный срок службы до первого капитального ремонта, лет 3) Удельная суммарная оперативная трудоемкость технических обслуживаний, чел.-ч/ед. наработки 4) Гарантийный срок, мес. 5) Ресурс объекта по точности до первого среднего ремонта при двухсменной работе, тыс. ч			
3. ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМИЧНОСТИ и др.			

4. Условия эксплуатации технического объекта

Условия эксплуатации технического объекта (режим сменности работы, режим нагружения, коэффициент использования и т. д.).

Коэффициент использования K_u определяется по формуле

$$K_u = K_{ue} K_{ud} K_c, \quad (3.27)$$

где K_{ue} – коэффициент использования в году; K_{ud} – коэффициент использования за день или сутки; K_c – коэффициент использования в смену.

$$K_{из} = \frac{K_p}{K_{оз}}, \quad (3.28)$$

где K_p – количество рабочих дней в году; $K_{оз}$ – рабочих дней в году, если производство непрерывное.

Так, например, в году примерно 250 рабочих дней, если производство непрерывное, то 365 рабочих дней. В производстве, допускающем перерывы на выходные дни, $K_{из} = 250/365 = 0,69$.

Коэффициент использования в сутки определяется количеством смен. Если по условиям производства сутки разбиваются на три рабочих периода, то:

- при односменной работе $K_{ид} = 0,33$;
- при двухсменной работе $K_{ид} = 0,67$;
- при трехсменной работе $K_{ид} = 1$.

Используется и иное разбиение суток, что предопределяет другие значения коэффициентов использования технической системы.

Коэффициент использования в смену K_c определяется коэффициентом загрузки оборудования. Например, для универсальных станков ориентировочно $K_c = 0,6...0,7$; для автоматических линий – $K_c = 0,8...0,9$. Уточнение коэффициента использования по мере необходимости можно продолжить и далее. Например, операционное время состоит из машинного и подготовительно-заключительного. Чем меньше по размерам деталь, то есть чем меньше объем механической обработки, тем меньше коэффициент загрузки оборудования, так как подготовительно-заключительное время будет стремиться к машинному.

Пример выполнения работы

1. Выбор объекта

В качестве объекта выберем токарно-винторезный станок 1А62, представленный на рис. 3.17.

2. Определение видов энергии опасности

При использовании указанного станка возможны следующие опасности для человека:

- от механической энергии: повреждение тела, слухового аппарата, вывихи, воздействие вибрации; травмы глаз;
- от электрической энергии: электрошок, электрические ожоги, нарушения дыхания и сердечной деятельности, повреждения тканей;
- психофизиологические: переутомление организма, ослабление внимания, ухудшение зрения, заторможенность реакции, эмоциональный стресс; возникновение новых и активизация имеющихся заболеваний.

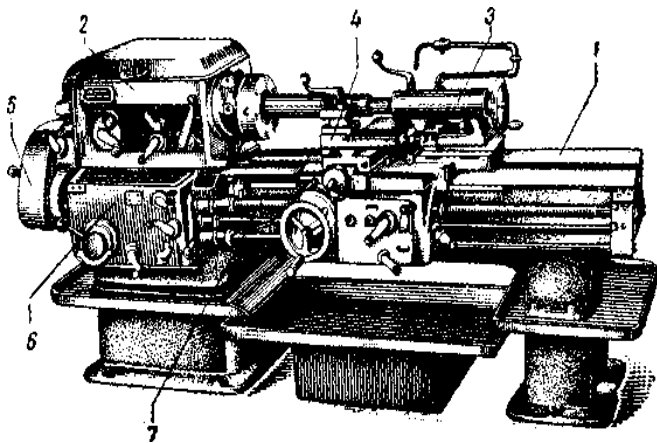


Рис. 3.17. Токарный станок:

1 – станина; 2 – передняя бабка; 3 – задняя бабка; 4 – суппорт;
 5 – гитара; 6 – коробка подач; 7 – винт – червяк и ходовой валик

3. Системная пентада

Рассмотрим системную пентаду для указанного станка (рис. 3.18).

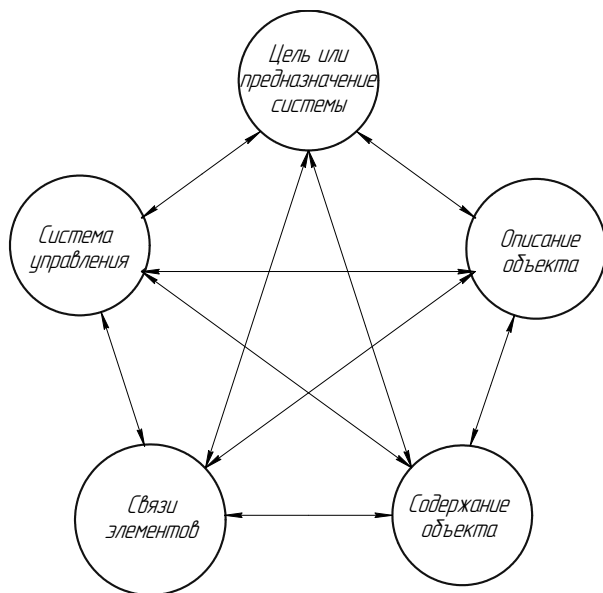


Рис. 3.18. Системная пентада

1. *Предназначение.* Станок предназначен для выполнения различных токарных работ и нарезания резьб: метрической дюймовой, модульной и питчевой.

Общий классификатор продукции (ОКП) токарного станка – 381101.

380000 – Оборудование металлообрабатывающее и деревообрабатывающее.

381000 – Станки металлорежущие.

381100 – Станки токарной группы.

2. *Описание объекта.* Надсистемой токарного станка являются станочные комплексы, а подсистемой – основные части, узлы и нормативы (рис. 3.19).

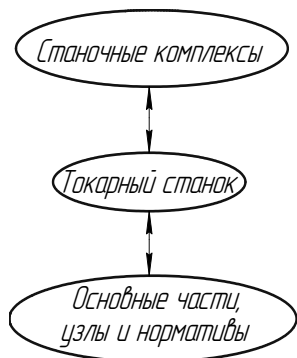


Рис. 3.19. Системная триада

3. *Содержание объекта.* Функциональный анализ системы определяет функции, которыми обладает система для выполнения своего предназначения (рис. 3.20).

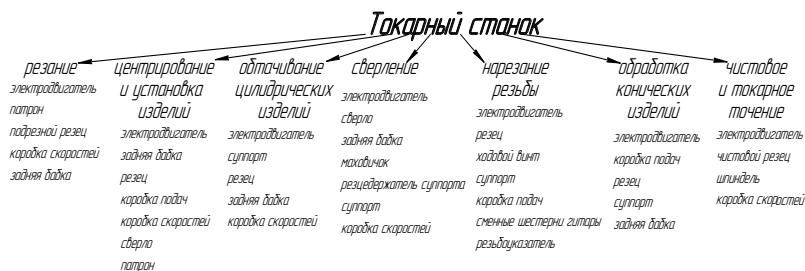


Рис. 3.20. Функциональный анализ

Основной функцией указанного токарного станка является нарезание резьбы, а дополнительными функциями – токарные работы.

Морфологический анализ включает в себя определение или задание структуры системы, т. е. определение или задание необходимых частей системы, требуемых для выполнения определённых ранее функций (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Морфологический анализ

Информационный анализ — анализ связи между функциональным и морфологическим (рис. 3.22).

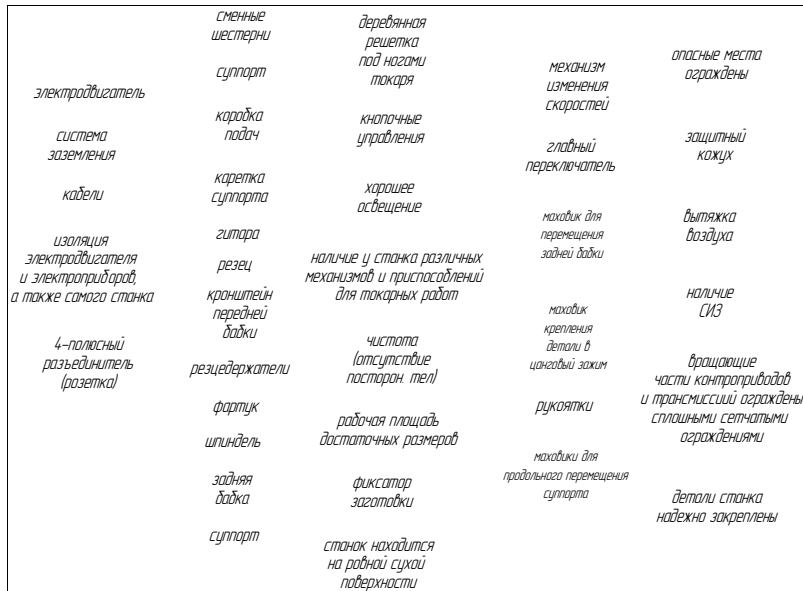


Рис. 3.22. Информационный анализ

Эмерджентностью станка является то, что он обладает резцом определённой конструкции и набором сменных шестерней, благодаря которым выполняются основные функции станка.

4. Связи элементов (рис. 3.23).

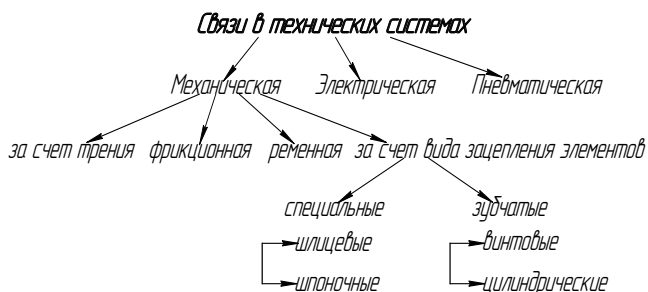


Рис. 3.23. Связи элементов

5. Система управления. Субъектом управления является токарь, объектом управления – токарный станок.

Управление механизмами токарного станка осуществляется в соответствии с прилагаемой к нему инструкцией. В ней дается схема станка с указанием органов управления и излагаются правила пользования ими. Прежде чем приступить к работе на станке, особенно незнакомой конструкции, необходимо эти правила тщательно изучить и практически четко отработать приемы пользования рукоятками, маховичками, кнопками и другими органами управления станком.

Бережное обращение с токарным станком необходимо всегда – во время работы, настройки, при проведении техуходов. Долголетней практикой выработано много правил обращения со станком. Основными из них являются следующие:

- 1) прежде чем пустить станок в работу, нужно его осмотреть, смазать, ознакомиться с его устройством, назначением и порядком включения пусковых рукояток;
- 2) при работе надо не забывать проверять правильность установки пусковых рукояток и всегда доводить их до фиксируемого положения;
- 3) ни в коем случае не следует включать и переключать шестерни на быстром ходу;
- 4) при обточке надо пользоваться ходовым валиком; ходовым винтом нужно пользоваться только при нарезании резьб;
- 5) нельзя править обрабатываемые изделия в центрах или на направляющих станины, так как это разрушает станок и лишает его точности обработки;

6) для удаления центра из шпинделя передней бабки следует пользоваться прутком с медным или латунным наконечником;

7) при обработке деталей в центрах нужно проверить, закреплена ли задняя бабка, а устанавливая изделие, смазать центр задней бабки и периодически смазывать его в процессе работы;

8) немедленно следует остановить станок, если центр задней бабки начнет сильно нагреваться и скрипеть;

9) при обточке длинных изделий необходимо следить за центром задней бабки и через некоторые промежутки времени смазывать его и проверять его нажим;

10) нельзя подводить резец слишком близко к оправке или планшайбе, так как их можно повредить, а резец сломать;

11) чтобы избежать заедания резьбы при надевании патрона, надо смазать шайбу и резьбу шпинделя, а патрон перед установкой должен быть прочищен от стружки и грязи и смазан;

12) после установки изделия в патроне нужно обязательно вынуть торцовый ключ, так как вращающийся патрон с ключом может вызвать поломку станка, а также увечь рабочего;

13) нельзя класть на направляющие станины обрабатываемые изделия, инструмент и другие металлические предметы, так как от этого портятся поверхности направляющих;

14) при переходе с обработки стали с охлаждением на обработку чугуна нужно хорошо вытереть станок, так как пыль от чугуна, смешиваясь с маслом или эмульсией, образует «кашицу», портящую трущиеся детали суппорта и направляющие станины; то же самое необходимо сделать и при переходе с обработки чугуна на обработку стали;

15) необходимо следить за смазкой станка и ни в коем случае нельзя держать масляные резервуары станка открытыми;

16) после окончания работы станок нужно очистить от стружки, вытереть от грязи и после этого смазать направляющие станины и суппорт чистым маслом.

Структура управления станка 1А62 – органическая, бригадная.

Схематически структура управления, элементы которой соединены смешанно, выглядит следующим образом (рис. 3.24).

Условия эксплуатации технического объекта

Задаются следующие исходные данные:

- срок службы $T_{ст} = 8$ лет;
- гамма-процентный ресурс $T_{пр} = 95\%$;
- условия эксплуатации – степень нагружения; точность изготовления объекта, режим работы; коэффициент использования в смену.

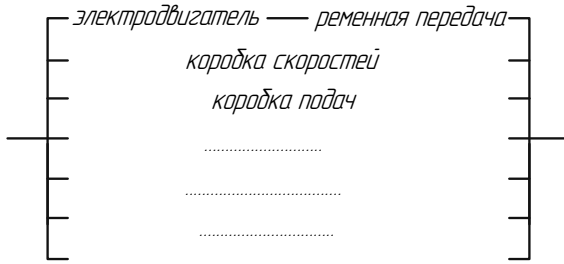


Рис. 3.24. Структура управления

Условия эксплуатации технического объекта (режим сменности работы, режим нагружения, коэффициент использования и т. д.).

Коэффициент использования $K_{И}$ определяется по формуле

$$K_{И} = K_{ИГ} \cdot K_{ИД} \cdot K_{С}, \quad (3.29)$$

где $K_{ИГ}$ – коэффициент использования в году; $K_{ИД}$ – коэффициент использования за день или сутки; $K_{С}$ – коэффициент использования в смену.

$$K_{ИГ} = \frac{K_{Р}}{K_{ДГ}}, \quad (3.30)$$

где $K_{Р}$ – количество рабочих дней в году; $K_{ДГ}$ – рабочих дней в году, если производство непрерывное.

В году примерно 250 рабочих дней, если производство непрерывное, то 365 рабочих дней. При производстве, допускающем перемены на выходные дни, $K_{ИГ} = 250/365 = 0,69$.

Задание

Провести краткий анализ и описание представленных систем (система 1 – производственный участок, где производится механическая обработка деталей типа шестерня; система 2 – система вентиляции в формовочном цехе) по следующему алгоритму:

- 1) выполнить описание исследуемой системы;
- 2) определить требования надежности и работоспособности представленных систем (указать виды энергии опасности и составить системную пентаду).

Система 1. В качестве исследуемой технической системы рассмотрим производственный участок механосборочного производства предприятия, где производится механическая обработка деталей типа шестерня для коробки передач автомобилей модельного

ряда «ВАЗ-2108». Данный производственный участок состоит из пяти аналогичных производственных линий, на которых осуществляется механическая обработка шестерен пяти видов для коробки передач автомобилей модельного ряда «ВАЗ-2108». На участке находится 32 единицы оборудования и выполняется 5 операций. Операция на внутришлифовальном станке 3К228В является конечной на линии, оборудование – основополагающее на участке, потому что выполняет сложную и важную операцию шлифования отверстия и торцов шестерни, обеспечивающую качество детали. Именно исполнение этой операции влияет на качество сборки коробки передач автомобиля «ВАЗ-2108», поэтому целесообразно провести качественный анализ надежности технической системы внутришлифовального станка 3К228В. Отказ этого элемента системы (сам по себе или в сочетании с отказами других элементов) приводит к отказу всей системы.

Внутришлифовальный станок 3К228В является универсальным, предназначен для шлифования цилиндрических и конических, глухих и сквозных отверстий, внутренних и наружных торцов. Станок имеет широкий диапазон частот вращения шлифовальных кругов, шпинделя изделия, величины поперечной подачи и скоростей перемещения стола, обеспечивающих обработку деталей на оптимальных режимах.

В процессе шлифования вращаются заготовка и шлифовальный круг при одновременном его возвратно-поступательном перемещении вместе со шлифовальной бабкой и столом. Шлифовальной бабке периодически сообщается поперечная подача. Работа торцешлифовального устройства происходит при вращении заготовки и шлифовального круга подачи вдоль оси.

Система 2. В качестве исследуемой системы рассмотрим вентиляцию в формовочном цехе литейного производства ОАО «СМиК» на участке сушки форм. В формовочном цехе в воздушную среду рабочих зон могут выделяться газы, пыль, а также избыточное конвекционное и лучистое тепло от сушильных печей. В формовочных отделениях применяют механическую приточную вентиляцию, которая сочетается с естественной, осуществляемой через фрамуги фонарей на крыше и оконные проемы. Общий механический приток воздуха сосредоточивают на участках формовки и сборки форм, на смежных участках заливки и выбивки форм устраивают местную механическую вытяжную вентиляцию.

Местная вытяжная вентиляция применяется для удаления пыли непосредственно от литейной формы. Вентиляция работает за счет электродвигателя.

Схема местной вентиляционной системы и схема забора воздуха представлены на рис. 3.25.

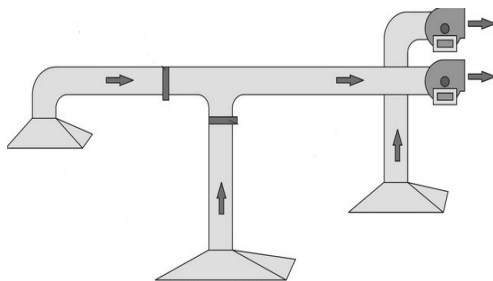


Рис. 3.25. Вентиляционная система

Фильтр вентиляции необходим для защиты как самой системы вентиляции, так и вентилируемых помещений от пыли, пуха, насекомых. В данной конструкции установлен один фильтр грубой очистки, который задерживает частицы величиной более 10 мкм.

Вентилятор — основа системы искусственной вентиляции.

Шумоглушитель необходим для предотвращения распространения шума по воздуховодам.

Воздуховоды предназначаются для проведения по ним воздушного потока. Воздухопроводная сеть состоит из тройников, поворотов, переходников, воздухораспределителей. Воздухораспределители служат для вывода очищенного воздуха в атмосферу.

Электрический щит — в нем монтируют систему управления и автоматики вентиляции.

Электродвигатель приводит во вращение рабочее колесо вентилятора. Он соединен с вентилятором клиноременной передачей с постоянным передаточным отношением.

В соответствии с установленными правилами внутреннего распорядка работа на предприятии производится в две смены.

ТЕСТЫ

1. Соотнесите основные показатели надежности в период эксплуатации и формулы:

- 1) частота отказов;
- 2) среднее время безотказной работы;
- 3) вероятность отказов в течение времени t ;
- 4) вероятность безотказной работы в течение времени t .

а) $a(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$;

- б) $P(t) = \exp(-\lambda t)$;
 в) $T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$;
 г) $Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$.

2. Соотнесите:

- 1) коэффициент вынужденного простоя $K_n =$;
- 2) коэффициент оперативной готовности, $K_{oz} =$;
- 3) коэффициент готовности, $K_g =$;
- 4) коэффициент технического использования, $K_{tu} =$.

а) $K_{\dot{A}} \cdot D(\tau)$;

б) $\frac{\dot{O}}{\dot{O} + \dot{O}_A}$;

в) $1 - \frac{\dot{O}}{\dot{O} + \dot{O}_A}$;

г) $\frac{\dot{O}}{\dot{O} + \dot{O}_A + \dot{O}_I}$.

3. Соотнесите основные виды технического состояния объекта и определения:

- 1) исправное состояние;
- 2) неисправное состояние;
- 3) работоспособное состояние;
- 4) неработоспособное состояние;
- 5) предельное состояние.

а) состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической конструкторской документации;

б) состояние объекта, при котором значения параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям нормативно-технической конструкторской документации;

в) состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно;

г) состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации;

д) состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям нормативно-технической конструкторской документации.

4. Свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной схеме технического обслуживания и ремонта:

- 1) живучесть;
- 2) ремонтпригодность;
- 3) долговечность;
- 4) безопасность.

5. Отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу испытываемых элементов при условии, что все элементы восстановятся, — это:

- 1) вероятность отказа;
- 2) частота отказов;
- 3) интенсивность отказов;
- 4) вероятность безотказной работы.

6. Вероятность безотказной работы в период эксплуатации выражается формулой:

- 1) $P(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$;
- 2) $P(t) = \exp(-\lambda \cdot t)$;
- 3) $P(t) = 1/\lambda$;
- 4) $P(t) = \exp(-\lambda \cdot t)^2$.

7. Установите соответствия:

- 1) частота восстановления;
- 2) вероятность восстановления;
- 3) интенсивность восстановления;
- 4) вероятность невозможности восстановления (несвоевременного завершения ремонта)
 - а) условная вероятность восстановления после момента времени t за время Δt при условии, что до момента t восстановление элемента не произошло;
 - б) вероятность того, что отказавший элемент не будет восстановлен в течение заданного промежутка времени;
 - в) производная от вероятности восстановления;

г) вероятность того, что элемент будет восстановлен в течение заданного времени.

8. Установите соответствия:

- 1) коэффициент готовности;
- 2) коэффициент оперативной готовности;
- 3) коэффициент вынужденного простоя.

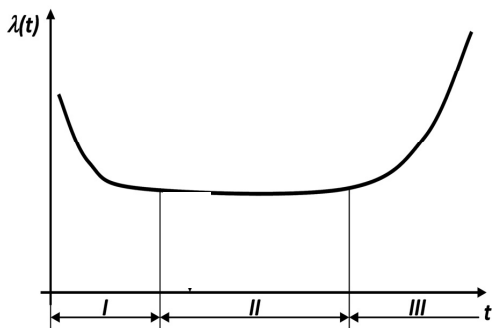
а) вероятность того, что объект работоспособен в произвольный момент времени и безошибочно работает в течение времени τ ;

б) вероятность того, что в произвольный момент времени t объект будет находиться в неработоспособном состоянии;

в) вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t .

9. На представленном графике укажите участок, на котором интенсивность отказа λ будет постоянна:

- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.



10. Среднее время восстановления определяется формулой:

1) $\dot{O} = 1/\mu$;

2) $\dot{O} = 1/\lambda$;

3) $\dot{O} = \sqrt{1/\mu}$.

11. Установите соответствия:

- 1) коэффициент технического использования $K_{tu} =$;
- 2) коэффициент готовности $K_g =$;
- 3) коэффициент оперативной готовности $K_{og} =$;
- 4) коэффициент вынужденного простоя $K_n =$.

а) $1 - \frac{\bar{D}}{\bar{D} + \bar{D}_A}$;

б) $\frac{\bar{D}}{\bar{D} + \bar{D}_A}$;

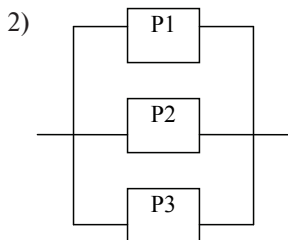
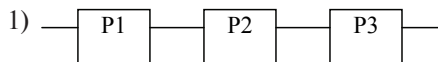
в) $\frac{\bar{D}}{\bar{D} + \bar{D}_A + \bar{D}_T}$;

г) $K_{ог} \cdot P(\tau)$.

12. Установите соответствия:

- 1) безотказность;
 - 2) отказ;
 - 3) режимная управляемость;
 - 4) безопасность.
- а) событие, заключающееся в нарушении работоспособности;
- б) свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды;
- в) свойство объекта поддерживать нормальный режим посредством управления;
- г) свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного интервала времени без вынужденных перерывов.

13. Укажите соответствия формул вероятности безотказной работы и вероятности отказа структурным схемам:



$$\text{а) } P_{\Sigma(t)} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = \prod_{i=1}^3 p_i(t);$$

$$\text{б) } Q_{\Sigma(t)} = q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 = \prod_{i=1}^3 q_i(t);$$

$$\text{в) } P_{\Sigma(t)} = 1 - Q_{\Sigma(t)} = 1 - \prod_{i=1}^3 q_i(t);$$

$$\text{г) } Q_{\Sigma(t)} = 1 - P_{\Sigma(t)} = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - q_i(t))$$

Контрольные вопросы

1. Напишите формулу для расчёта среднеквадратичного отклонения случайной величины x , принимающей возможные значения x_1, x_2, \dots, x_r с вероятностями P_1, P_2, \dots, P_r .
2. Чему равна плотность вероятности (плотность распределения) $f(x)$, если вероятность нахождения x в пределах интервала Δx составляет ΔP ?
3. Чему равна вероятность того, что случайная величина x окажется в интервале Δx ?
4. Какую размерность имеет плотность распределения или плотность вероятности $f(x)$?
5. Напишите формулу для расчёта интегральной функции распределения $F(x)$ непрерывной случайной величины.
6. Каков геометрический смысл интегральной функции распределения непрерывной случайной величины?
7. Напишите дифференциальный закон плотности распределения непрерывной случайной величины.
8. Как называется квантиль, соответствующий вероятности $P = 0,5$?
9. Каков геометрический смысл медианы распределения?
10. Чему равно математическое ожидание постоянной величины?
11. Чему равно среднеквадратичное отклонение постоянной величины?

Модуль 4

ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК И ЕГО АНАЛИЗ

Учебные вопросы

- Основные понятия риска и безопасности.
 - Анализ риска при наличии опасных и вредных факторов.
 - Методы качественного и количественного анализа надежности и риска.
 - Дискретные и непрерывные распределения и их применение к задачам определения.
 - Сложные системы, их надежность и опасность.
 - Особенности составления структурной схемы систем.
- Резервирование, классификация.

- Алгоритм анализа более сложных систем.

Изучив данную тему, студент должен:

иметь представление:

- о современных аспектах техногенного риска;
- алгоритмах исследования опасностей;
- теории и модели происхождения и развития ЧП;
- методах анализа надежности и риска;

знать:

- определения риска и безопасности;
- условие безопасности;
- теории и модели происхождения и развития несчастных случаев, аварий, катастроф;
 - методы качественного анализа надежности и риска СЧМС;
 - методы количественного анализа надежности и риска;
 - основные типы структур сложных систем с точки зрения надежности и опасности;

- классификацию резервирования технических систем,

уметь:

- выполнять качественный и количественный анализ надежности технических систем;
- проводить оценку и расчет риска;

владеть навыками:

- применения методик качественного анализа опасности сложных технических систем;

- использования количественных методов анализа опасностей и оценки риска;
- оценки риска и обеспечения безопасности технических систем.

Методические рекомендации по изучению темы

При освоении темы необходимо:

- изучить учебный материал по теме «Техногенный риск и его анализ»;
- акцентировать внимание на понятиях риска и методах обеспечения безопасности технических систем;
- выполнить задание после теоретической части;
- выполнить тесты по теме;
- ответить на контрольные вопросы.

Практическое занятие 2

Расчет надежности технических систем и их элементов по данным условий эксплуатации и конструкции изделий

Цель – приобрести навыки расчета надежности технических систем и их элементов по условиям эксплуатации.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть практического задания.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–3.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

1. Расчет показателей надежности следует проводить на двух стадиях:

1) предварительный (ориентировочный) – на стадии технического задания на разработку изделия (ТЗ) с целью оценки значений показателей в выдвигаемых требованиях заказчика и служит основанием для их внесения в ТЗ;

2) уточненный – на стадии технического проекта (ТП) с целью подтверждения соответствия значений показателей требованиям ТЗ и служит основанием для их включения в конструкторскую документацию.

2. Показатели надёжности изделия, необходимые для расчета эффективности изделия, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Показатели надёжности изделия

Наименование показателя	Обозначение
1	2
Показатели безотказности:	
вероятность безотказной работы	$P(t)$
наработка на отказ, ч	T
интенсивность отказов, ч ⁻¹	λ_i
Показатели долговечности:	
ресурс между плановыми ремонтами	
текущими, ч	$T_{рт}$
средними, ч	$T_{рс}$
капитальными, ч	$T_{рк}$
срок службы до списания, лет	$T_{сл}$
гамма-процентный срок службы	γ
Показатели ремонтпригодности:	
среднее время восстановления, ч	T_v
продолжительность плановых ремонтов	
текущего ремонта, ч	$T_{пт}$
среднего ремонта, ч	$T_{пе}$
капитального ремонта, ч	$T_{пк}$
Комплексные показатели	
коэффициент готовности	K_g
коэффициент технического использования	$K_{ти}$

Примечание. В соответствии с ГОСТ 22851-77 показатели могут быть средними, назначенными и гамма-процентными. Установленные показатели долговечности (по ГОСТ 23642-79 и ОСТ 26-01-150-82) должны определяться по гамма-процентным показателям.

3. Расчету надежности должен предшествовать анализ условий эксплуатации и конструкции изделия.

При анализе определяются элементы (сборочные единицы, детали), приводящие к отказам изделия, и взаимосвязь отказывающих элементов. Выявляются факторы, приводящие к разрушению элементов изделия, соответствующий им характер проявления разрушения (постепенный или внезапный) и возможность наблюдения за разрушением (или его проявлением). Наличие последнего

обстоятельства дает возможность предупреждать отказы путем своевременного проведения ремонта (технического обслуживания) и является основой при определении системы планово-предупредительных ремонтов и технического обслуживания.

4. Показатели надежности и эффективности функционирования следует рассчитывать исходя из годового фонда времени (8640 ч), т. к. экономические характеристики, используемые в расчете экономической эффективности, определяются за годовой цикл эксплуатации (период между ежегодными остановочными ремонтами, включая время простоя в одном из них).

5. Расчет надежности системы автоматизации (СА) должен проводиться отдельно и включаться в расчет надежности изделия, т. е. система автоматизации должна рассматриваться как элемент изделия. Исходными данными для расчета надежности и эффективности функционирования разрабатываемого изделия являются:

- показатели надежности элементов (сборочных единиц, деталей) аналога, эксплуатируемого в сходных условиях, полученные в виде «точечных» оценок;
- техническая характеристика разрабатываемого изделия, оговоренная в конструкторской документации.

Для расчёта надёжности и эффективности функционирования на основании конструктивной схемы изделия и критериев его отказа следует составлять структурную схему расчёта надёжности, состоящую из последовательно соединённых элементов – сборочных единиц (деталей), выход из строя каждой из которых приводит к отказу изделия.

Расчёт рекомендуется выполнять в следующем порядке:

- 1) определение показателей безотказности;
- 2) показателей долговечности;
- 3) показателей ремонтпригодности;
- 4) комплексных показателей надёжности и эффективности функционирования.

Все свойства надёжности изделия (безотказность, долговечность и ремонтпригодность) взаимосвязаны, поэтому изменение одних показателей влечёт за собой изменение других, о чём при выполнении расчёта необходимо иметь ясное *представление*.

1. *Определение показателей безотказности*

В качестве исходных данных для расчёта безотказности разрабатываемого изделия следует использовать значения наработки на отказ (средней наработки до отказа) элементов изделия-аналога или другого изделия в сходных условиях эксплуатации.

При изменении масштаба элемента по сравнению с элементом аналогичного назначения и конструктивного исполнения определение средней наработки до отказа элемента может быть выполнено с использованием масштабного пересчёта по формуле

$$T_i = T_{ia} \cdot M^{-1/b}, \text{ ч}, \quad (4.1)$$

где T_i – средняя наработка до отказа i -го элемента аналога, ч; M – масштаб элемента, определяемый по табл. 4.2; b – параметр, определяемый в зависимости от коэффициента вариации наработки до отказа v по табл. 4.3.

Таблица 4.2

Определение величины масштаба элемента

Основная причина разрушения элемента изделия	Величина масштаба (М) определяется
Разрушение сварных швов и других неразъёмных соединений поверхностей	Отношением длин швов соединений
Коррозионное разрушение поверхностей, гидро- и газоабразивное разрушение поверхностей	Отношением площадей изнашиваемых поверхностей
Истирание рабочих поверхностей (в том числе торцевых и сальниковых уплотнений, подшипников скольжения)	Отношением площадей изнашиваемых поверхностей
Усталостное и хрупкое разрушение, пластическое деформирование, деструкция или разупрочнение	Отношением объёмов нагруженных участков элементов

При отсутствии данных об отказах элемента, но известном распределении ресурса для таких элементов (это возможно при известных закономерностях изнашивания элементов) среднюю наработку до отказа элемента (T_i) за период эксплуатации изделия между ремонтами, T_p , во время которых производится его замена или восстановление, следует определять по формуле

$$T_i = \frac{T_p}{\ln(1/P(T_p))}, \text{ ч}, \quad (4.2)$$

где $P(T_p)$ – вероятность безотказной работы элемента за наработку T_p (по формулам табл. 4.5).

Формула (4.2) даёт нижнюю оценку T_i , т. е. с некоторым запасом.

Таблица 4.3

*Значения параметров b и K_v в зависимости
от коэффициента вариации v*

b	K_v	v	b	K_v	v
0,8	1,130	1,260	3,1	0,895	0,354
0,9	1,050	1,110	3,2	0,896	0,343
1,0	1,000	1,000	3,3	0,897	0,335
1,1	0,965	0,910	3,4	0,898	0,326
1,2	0,941	0,837	3,5	0,900	0,316
1,3	0,924	0,775	3,6	0,901	0,310
1,4	0,911	0,723	3,7	0,902	0,302
1,5	0,903	0,678	3,8	0,903	0,297
1,6	0,897	0,640	3,9	0,905	0,288
1,7	0,892	0,605	4,0	0,906	0,281
1,8	0,889	0,575	4,5	0,913	0,253
1,9	0,887	0,547	5,0	0,918	0,230
2,0	0,836	0,523	6,0	0,928	0,194
2,1	0,886	0,498	7,0	0,935	0,168
2,2	0,886	0,480	8,0	0,942	0,148
2,3	0,886	0,471	9,0	0,947	0,132
2,4	0,887	0,444	10,0	0,951	0,120
2,5	0,387	0,428	12,0	0,960	0,102
2,6	0,888	0,413	14,0	0,964	0,088
2,7	0,889	0,398	16,0	0,969	0,077
2,8	0,890	0,386	18,0	0,971	0,069
2,9	0,8915	0,375	20,0	0,974	0,0625
3,0	0,893	0,365	25,0	0,978	0,0510

При отсутствии сведений об элементах их средняя наработка до отказа может быть определена ориентировочно по справочным данным с использованием зависимости $Ti = 1/\lambda_i$, ч.

Для учёта рассеяния значений показателей надёжности результаты расчёта могут быть представлены в виде доверительных интервалов (в соответствии с ГОСТ 27503-81). В этом случае рекомендуется значение доверительной вероятности принимать равным 0,8 для всех рассматриваемых вариантов разрабатываемого изделия.

При наличии информации о законах распределения ресурсов элементов расчёт безотказности и долговечности можно выполнить более точно, используя, например, известные методы.

2. *Определение показателей долговечности*

Оценка долговечности изделия должна включать в себя определение ресурса до текущего, среднего и капитального ремонта, срока службы до списания и составление структуры ремонтного цикла.

За ремонтный цикл рекомендуется принимать ресурс до капитального ремонта, в течение которого планировать проведение текущих (средних) ремонтов. Численные значения ресурсов до плановых ремонтов следует определять на основании анализа структур планово-предупредительных ремонтов (ППР).

Значение ресурса между текущими ремонтами следует определять по гамма-процентному ресурсу (формулы п. 5, 7 табл. 4.5) наименее долговечного быстроизнашиваемого элемента. Периодичность текущих ремонтов следует назначать кратной месячной наработке (при непрерывной эксплуатации 720 ч) или (для малонадёжных элементов) суточной наработке (24 ч).

Значение ресурса до капитального ремонта изделия следует определять по гамма-процентному ресурсу наименее долговечного базового элемента. К базовым элементам относят основные части изделия, предназначенные для его компоновки и установки других составных частей.

При наличии в изделии элементов с ресурсом значительно большим, чем ресурс быстроизнашиваемых элементов, но меньшим гамма-процентного ресурса базовых элементов, в ремонтный цикл следует включать средние ремонты с периодичностью, равной гамма-процентному ресурсу указанных элементов.

Срок службы до списания непрерывно работающих изделий следует определять по формуле

$$T_{сл} = \frac{T_r(d+1)}{8640}, \text{ лет}, \quad (4.3)$$

где d – целесообразное число капитальных ремонтов; для химического оборудования обычно равно 1–5; количество капитальных ремонтов должно быть обосновано и назначено с учётом условий эксплуатации и системы предупредительно-планового ремонта.

Для периодически работающих изделий в формулу (4.3) необходимо вводить коэффициент, учитывающий планируемые прстои изделия.

3. *Определение показателей ремонтпригодности*

Определение среднего времени восстановления после отказа T_g должно осуществляться по формуле табл. 4.5, где T_{ei} – среднее время восстановления элемента.

Продолжительность простоя в каждом из плановых ремонтов следует принимать по данным эксплуатации аналога или дополнительным расчетом, исходя из допущения, что ремонты выполняются одной бригадой последовательным методом по группам сборочных единиц.

Продолжительность текущего ремонта должна определяться по времени, необходимому для замены (ремонта) элементов, лимитирующих безотказность изделия.

Продолжительность среднего ремонта должна определяться по времени, необходимому для замены (ремонта) элементов, имеющих ресурс, равный периодичности средних ремонтов.

Продолжительность капитального ремонта должна определяться временем, необходимым на восстановление базовых элементов.

В дополнение к основному должно учитываться время, затрачиваемое на удаление продуктов переработки, подготовительные операции, разборку изделия и последующую после ремонта сборку, регулировку и испытание.

Техническое обслуживание изделия, осуществляемое без остановки изделия, в расчете надежности не учитывается. При необходимости остановки продолжительность простоя должна определяться аналогично продолжительности простоя в плановом ремонте.

Определение количества плановых ремонтов, общей продолжительности плановых ремонтов, числа отказов и продолжительности простоя в неплановых ремонтах должно осуществляться по формулам табл. 4.5.

Данные о структуре ремонтных циклов и продолжительности простоя в плановых ремонтах следует представлять в форме табл. 4.4.

4. *Определение комплексных показателей надежности и эффективности функционирования*

Комплексными показателями надежности являются коэффициент готовности и коэффициент технического использования, который вместе с тем характеризует эффективность функционирования системы, т. к. определяет годовой ресурс изделия. Еще одним показателем эффективности функционирования изделия является годовой объем выпускаемой продукции, значение которого

зависит от показателей надежности и часовой производительности изделия.

Формулы для определения указанных показателей приведены в табл. 4.5. Данные формулы справедливы для изделий, предназначенных для непрерывной работы, в таких случаях ресурс между плановыми ремонтами принимают равным их периодичности. Для изделий, работающих периодически, необходимо учитывать перемены в использовании изделия.

Таблица 4.4

Показатели системы планово-предупредительных ремонтов изделия

Наименование показателя	Обозначение	Числовое значение
Ресурс между плановыми ремонтами		
– текущими, ч	$T_{рт}$	
– средними, ч	$T_{рс}$	
– капитальными, ч	$T_{рк}$	
Продолжительность ремонтов		
– текущего, ч	$T_{пт}$	
– среднего, ч	$T_{пс}$	
– капитального, ч	$T_{пк}$	

Таблица 4.5

Расчет показателей надежности и эффективности функционирования изделия

Наименование показателя	Обозначение и расчетная формула	Числовое значение
1. Нарботка на отказ, ч	$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^z \frac{n_i}{T_i}},$ <p>где z – число элементов; T_i, n_i – см. табл. 4.6</p>	
2. Среднее время восстановления, ч	$T_b = \sum_{i=1}^z \frac{n_i \cdot T_{bi}}{T_i},$ <p>где T_{bi} – см. табл. 4.6</p>	

Наименование показателя	Обозначение и расчетная формула	Числовое значение
3. Число плановых ремонтов	$d_n = \frac{8640}{T_{\text{пт}}},$ где $T_{\text{пт}}$ – см. табл. 4.4	
4. Число капитальных ремонтов	$d_k = \frac{8640}{T_{\text{пк}}},$ где $T_{\text{пк}}$ – см. табл. 4.4	
5. Число средних ремонтов	$d_c = \frac{8640}{T_{\text{пс}}} - d_k,$ где $T_{\text{пс}}$ – см. табл. 4.4	
6. Число текущих ремонтов	$d_m = d_n - d_k - d_c$	
7. Продолжительность плановых ремонтов, ч	$t_n = d_m \cdot T_{\text{пт}} + d_c \cdot T_{\text{пс}} + d_k \cdot T_{\text{пк}},$ где $T_{\text{пт}}, T_{\text{пс}}, T_{\text{пк}}$ – см.табл. 4.4.	
8. Коэффициент готовности	$K_z = \frac{T}{T + T_6}$	
9. Коэффициент технического использования	$K_{\text{ми}} = \frac{8640 - t_n}{8640} \cdot K_z$	
10. Годовой ресурс, ч	$T_{\text{пз}} = 8640 \cdot K_{\text{ми}}$	
11. Годовой объём продукта, т (м ³)	$B = T_{\text{пз}} \cdot q_0,$ где q_0 – часовая производительность, т (м ³)/ч	
12. Число отказов	$m = \frac{T_{\text{пз}}}{T}$	
13. Продолжительность unplanned ремонтов, ч	$t_6 = 8640 - T_{\text{пз}} - t_n$	

Примечания.

1. В формуле пункта 7 учитывается продолжительность плановых ремонтов с ресурсом менее или равным 8640 ч.

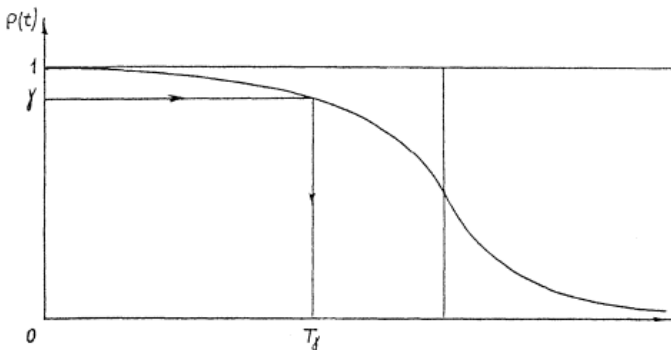
2. При определении числового значения по формулам пунктов 3, 4, 5 и 12 учитывается только целая часть числа без округления в сторону увеличения.

Показатели надёжности элементов изделия

Наименование элемента	Число элементов n	Средняя наработка до отказа, ч T_i	Среднее время восстановления T_{oi}
1.			
2.			
3.			
...			

Определение гамма-процентного ресурса элементов

Величины ресурсов элементов (и изделий) одной и той же партии не имеют равных значений даже при строгом поддержании нагрузки на одном и том же уровне, а подчиняются некоторому статистическому распределению, группирующемуся около некоторой величины, называемой средним ресурсом T_{cp} (рис. 4.1).

Рис. 4.1. Определение γ %-го ресурса элемента по кривой $P(t)$

В соответствии с ГОСТ 13377-75 гамма-процентным (γ %) ресурсом до отказа элемента называется такой ресурс, который имеет или превышает гамма-процентов элементов данного типа. Для одного элемента это означает, что вероятность достижения элементом указанного ресурса составляет гамма-процентов. Величина γ выбирается равной 1,00; 0,99; 0,95; 0,90; 0,80; 0,50 в зависимости от ответственности элемента и его стоимости. При выборе повышенных значений уменьшается межремонтный период и возрастают затраты на ремонты.

Определение γ % ресурса может быть осуществлено по кривой вероятности распределения ресурса элемента (рис. 4.1).

При нормальном распределении ресурса элемента:

$$P(t) = F_0(x) = F_0\left(\frac{T_{cp} - t}{T_{cp} \cdot \nu}\right), \quad (4.4)$$

гамма-процентный ресурс элемента определяется по формуле:

$$T_\gamma = T_{cp} (1 - x \cdot \nu), \quad (4.5)$$

где x – определяется в зависимости от $\gamma = F_0(x)$ по табл. 4.9.

При распределении Вейбулла:

$$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t \cdot K_b}{T_{cp}}\right)^6\right] \quad (4.6) \quad (4.6)$$

гамма-процентный ресурс определяется:

$$T_\gamma = \frac{T_{cp}}{K_6} \left(\ln \frac{1}{\gamma}\right)^{1/6}, \quad (4.7)$$

где параметры K_6 и b определяются в зависимости от коэффициента вариации ν по табл. 4.3.

Если разработчику неизвестен закон распределения ресурса элемента, то вид закона распределения и его параметры могут быть ориентировочно определены по табл. 4.7 и 4.8. Ограничение двумя распределениями – нормальным и Вейбулла – объясняется тем, что эти распределения хорошо аппроксимируют все возможные случаи распределения ресурсов элементов машин и агрегатов и рекомендованы в тех случаях, когда законы распределения ресурсов элементов неизвестны.

Таблица 4.7

Классификация факторов, определяющих вид распределения ресурса элементов

Общее определение классифицируемого фактора	Признак проявления фактора	Шифр фактора
Характер разрушения	Постепенный	1
	Внезапный	2
Стабильность условий эксплуатации	Стабильные	1
	Изменяющиеся в широких пределах	2
Степень нагруженности	Нагрузки, близкие к максимальным	1
	Средние нагрузки	2
Уровень технологии изготовления	Высокий уровень	1
	Средний уровень	2

Таблица 4.8

Значения коэффициентов вариации распределений ресурсов
для ориентировочных расчетов надежности элементов

Шифры определяющих факторов из табл. 4.7				Вид закона распреде- ления (Н – нор- мальный, В – Вейбулла)	Диапазон изменения коэффици- ента вариа- ции, V
Характер разруше- ния	Стабиль- ность эксплуа- тации	Степень нагружен- ности	Уровень технологии изготовле- ния		
1	1	1	1	Н	0,10–0,20
1	1	1	2	Н	0,20–0,25
1	1	2	1	Н	0,20–0,30
1	2	1	1	В	0,30–0,40
1	2	1	2	В	0,40–0,50
1	2	2	1	В	0,40–0,60
1	2	2	2	В	0,50–0,60
2	1	1	1	В	0,30–0,40
2	1	1	2	В	0,30–0,45
2	1	2	1	В	0,35–0,50
2	2	1	1	В	0,35–0,55
2	2	1	2	3	0,40–0,55
2	2	2	1	В	0,40–0,60
2	2	2	2	В	0,50–0,70

Таблица 4.9

Значения $F_0(x)$

x	F_0	x	F_0	x	F_0
0,00	0,5000	1,35	0,9115	2,70	0,9965
0,05	0,5199	1,40	0,9192	2,75	0,9970
0,10	0,5393	1,45	0,9265	2,30	0,9974
0,15	0,5596	1,50	0,9332	2,85	0,9978
0,20	0,5793	1,55	0,9394	2,90	0,9981
0,25	0,5987	1,60	0,9452	2,95	0,9984
0,30	0,6179	1,65	0,9505	3,00	0,9986
0,35	0,6368	1,70	0,9554	3,05	0,9983
0,40	0,6554	1,75	0,9599	3,10	0,9990

Продолжение табл. 4.9

x	F_0	x	F_0	x	F_0
0,45	0,6736	1,80	0,9641	3,15	0,9992
0,50	0,6915	1,85	0,9673	3,20	0,9993
0,55	0,7088	1,90	0,9713	3,25	0,9994
0,60	0,7257	1,95	0,9744	3,30	0,9995
0,65	0,7422	2,00	0,9772	3,35	0,9996
0,70	0,7530	2,05	0,9790	3,40	0,99966
0,75	0,7734	2,10	0,9821	3,45	0,99972
0,80	0,7881	2,15	0,9842	3,50	0,99977
0,85	0,8023	2,20	0,9861	3,55	0,99931
0,90	0,8159	2,25	0,9878	3,60	0,99984
0,95	0,8289	2,30	0,9893	3,65	0,99987
1,00	0,8413	2,35	0,9906	3,70	0,99989
1,05	0,8531	2,40	0,9918	3,8	0,99993
1,10	0,8643	2,45	0,9929	3,9	0,99995
1,15	0,8749	2,50	0,9933	4,0	0,999963
1,20	0,8849	2,55	0,9946	4,1	0,999979
1,25	0,8944	2,60	0,9953	4,2	0,999937
1,30	0,9032	2,65	0,9960	4,3	0,999991
				4,4	0,999995
				4,5	0,999997
				4,6	0,999998
				4,7	0,999999

Практическое использование результатов расчета

1. Результаты расчета должны служить обоснованием значений показателей надёжности и эффективности функционирования при выборе варианта конструктивно-схемного решения изделия, а также исходными данными для расчёта технико-экономических показателей и оценки уровня качества.

2. Значения показателей надёжности, определяемые в результате расчёта в соответствии с требованиями нормативных документов Государственного стандарта, должны быть включены в конструкторские документы:

- пояснительную записку – раздел расчёта надёжности (в соответствии с ГОСТ 2.106-68);
- технические условия – в разделе «Техническая характеристика» приводятся значения основных показателей в соответствии

с РД РТМ 26-01-135-81 и ОСТ 26-01-150-82 (требование ГОСТ 2.114-70). В разделе «Методы контроля» следует указать методы подтверждения значений показателей, приведённых в первом разделе технических условий;

– информационную карту (приложение к техническим условиям). В качестве исходных данных для расчёта экономической эффективности и цен на новое изделие рекомендуется использовать следующие параметры: время работы изделия за год (или годовой объём продукции), срок службы (или ресурс до капитального ремонта), продолжительность простоя в ремонте (текущие затраты потребителя) и др.;

– карту технического уровня и качества продукции – технические и экономические параметры, определяющие качество изделия;

– программу и методику испытаний – показатели качества и надёжности изделия, проверка удобства обслуживания и проведения ремонтов, продолжительность и режим испытаний. Значения показателей должны проверяться в процессе приёмочных испытаний и в условиях промышленной эксплуатации изделия.

Пример 1. Отказы торцевых уплотнений в основном вызываются недопустимой утечкой жидкости между уплотняющими кольцами вследствие их износа. Необходимо определить среднюю наработку до отказа торцевых уплотнений диаметром 120 мм и шириной кольца ν , если известно, что средняя наработка до отказа торцевого уплотнения диаметром 80 мм и шириной кольца ν составляет 3000 ч, а её коэффициент вариации равен 0,2. Условия эксплуатации (удельные нагрузки), материалы и технология изготовления одинаковые.

Решение. В соответствии с табл. 4.2 определяем величину масштаба по отношению площадей изнашиваемых поверхностей:

$$M = \frac{\pi \cdot D \cdot \nu}{\pi \cdot D \cdot \nu} = \frac{\pi \cdot 120 \cdot \nu}{\pi \cdot 80 \cdot \nu} = 1,5.$$

По табл. 4.3 для коэффициента вариации 0,2 определяем значение параметра $\nu = 5,8$. По формуле (4.1) определяем среднюю наработку до отказа большего уплотнения:

$$T = T_a \cdot M^{\frac{1}{\nu}} = 3000 \cdot 1,5^{\frac{1}{5,8}} = 2800 \text{ ч.}$$

Если необходимо сохранить ресурс, равный 3000 ч, то следует принять какие-то меры, например уменьшить удельную нагрузку

на изнашиваемую поверхность путём увеличения ширины кольца.

Пример 2. По результатам эксплуатации теплообменников с развальцованными трубами известно, что основной причиной их отказов является нарушение герметичности в местах развальцовки труб. При этом известно, что наработка на отказ теплообменника, имеющего 200 развальцовок, составляет 1000 ч, а коэффициент вариации равен 0,3.

Вновь сконструированный теплообменник имеет 100 развальцовок. Необходимо определить его наработку на отказ.

Решение. В соответствии с табл. 4.2 определяем $M = 100/200 = 0,5$. По табл. 4.3 для коэффициента вариации 0,3 определяем параметр $v = 3,7$. По формуле (4.1) определяем:

$$T = T_a \cdot M^{\frac{1}{v}} = 1000 \cdot 0,5^{\frac{1}{3,7}} = 1200 \text{ ч}$$

Пример 3. Расчёт надёжности и эффективности.

Аппарат для производства пиперизина ПМ 3,2–0,2/0,05.

Техническая характеристика:

объём $V = 3,2 \text{ м}^3$;

объёмная производительность $150 \text{ м}^3/\text{ч}$;

температура $t = 320^\circ \text{ C}$;

мощность привода $N = 11 \text{ кВт}$;

скорость вращения $n = 30 \text{ об/мин}$;

мешалка лопастная.

Структурная схема для расчёта надёжности составлена на основании принципиальной схемы аппарата и включает только те элементы (сборочные единицы), которые лимитируют надёжность аппарата. Расчетная схема состоит из четырёх последовательно соединённых элементов, отказ любого из них приводит к отказу аппарата.

Значения показателей безотказности и ремонтпригодности разрабатываемого аппарата, определённые по данным о надёжности элементов действующих аппаратов, работающих в аналогичных условиях (ПХФО «Олайнфарм»), приведены в табл. 4.10.

Значения показателей долговечности и ремонтпригодности, определённые на основании анализа структур ППР действующих аппаратов, приведены в табл. 4.11.

Порядок расчёта и результаты приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.10

Показатели надёжности элементов аппарата

Наименование i -го элемента	Число элементов	Наработка на отказ, ч, T_i	Среднее время восстановления, ч, T_{vi}
1. Привод (мотор-редуктор)	1	35000	8
2. Уплотнение торцевое	1	2000	32
3. Мешалка	1	80000	16
4. Корпус	1	85	12

Таблица 4.11

Система планово-предупредительного ремонта

Наименование показателя	Числовое значение
Ресурс между ремонтами	
– текущими $T_{пр}$, ч	1440
– средними $T_{рс}$, ч	8640
– капитальными $T_{рк}$, ч	34560
Продолжительность ремонтов	
– текущего $T_{пр}$, ч	32
– среднего $T_{рс}$, ч	120
– капитального $T_{рк}$, ч	168
Число капитальных ремонтов	2

Таблица 4.12

Расчет показателей надёжности и эффективности функционирования

Наименование показателя	Обозначение и расчетная формула	Числовое значение
1	2	3
1. Наработка на отказ, ч	$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{T_i}}$	1808
2. Среднее время восстановления, ч	$T_b = \sum_{i=1}^4 \frac{1 \cdot T_{bi}}{T_i}$	30

Продолжение табл. 4.12

1	2	3
3. Число плановых ремонтов	$d_n = \frac{8640}{T_{пр}}$,	6
4. Число капитальных ремонтов	$d_r = \frac{8640}{T_{пр}}$	0
5. Число средних ремонтов	$d_c = \frac{8640}{T_{pc}} - d_k$	1
6. Число текущих ремонтов	$d_m = d_n - d_k - d_c$	5
7. Продолжительность плановых ремонтов, ч	$t_n = d_m \cdot T_{нт} + d_c \cdot T_{nc} + d_k \cdot T_{нк}$	280
8. Коэффициент готовности	$K_z = \frac{T}{T + T_г}$	0,983
9. Коэффициент технического использования	$K_{mu} = \frac{8640 - t_n}{8640} \cdot K_z$	0,951
10. Годовой ресурс, ч	$T_{pz} = 8640 \cdot K_{mu}$	8217
11. Годовой объем продукции, м	$T_{pz} = 8640 \cdot K_{mu}$	123255
12. Число отказов	$m = \frac{T_{pz}}{T}$	4
13. Продолжительность unplanned ремонтов, ч	$t_г = 8640 - T_{pz} - t_n$	143
14. Срок службы, лет	$T_{сл} = \frac{T_{пу}(d_n + 1)}{8640}$	12

Выводы и заключения

Предлагаемые конструктивные решения элементов и разрабатываемого аппарата при принятой системе ППР обеспечивают значения показателей надежности, установленные в техническом задании:

наработка на отказ, ч – не менее 1800;

коэффициент технического использования – не менее 0,95.

Пример 4. Время работы элемента до отказа подчинено нормальному закону с параметрами $T_1 = 8000 \div$, $\sigma = 2000 \div$. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $P(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$ и T_{cp} для $t = 4000$ ч.

Решение. Используя формулы для $P(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$ и T_{cp} для нормального закона распределения, приведённые в табл. 3.7, вычисляем вероятность безотказной работы

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)} = F[(8000 - t)/2000] / F.$$

Для вычисления $P(4000)$ находим $F(2) = 0,97725$ и $F(4) = 1$, тогда

$$P(4000) = F[(8000 - 4000)/2000] / F(4) = F(2) / F(4) = 0,97725 / 1 = 0,97725.$$

$$\text{Частота отказов } a(t) = \frac{\exp\left[-\frac{(t - T_1)^2}{2\sigma^2}\right]}{F(T_1/\sigma)\sigma\sqrt{2\pi}};$$

$$\text{функции } \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2 / 2).$$

В данном случае $x = (t - T_1) / \sigma$.

Имея в виду, что $F(T_1 / \sigma) = F(8000 / 2000) = F(4) \approx 1$, находим $a(t) = \varphi(x) / \sigma$ [12].

Тогда:

$$a(4000) = \varphi((4000 - 8000) / 2000) / \sigma = \varphi(-2) / 2000 = \varphi(2) / 2000 = 2,7 \cdot 10^{-5} 1/ч$$

$$\lambda(4000) = a(4000) / P(4000) = 2,7 \cdot 10^{-5} / 0,97725 = 2,76 \cdot 10^{-5} 1/ч.$$

Вычисляем среднюю наработку до первого отказа

$$T_{cp} = T_1 + \sigma \cdot \exp(-T_1^2 / 2\sigma^2) / \sqrt{2\pi} F(T_1 / \sigma) = 8000 + 2000 \exp(-0,5 \cdot 4^2) / \sqrt{2\pi} F(4) = 8000,26 \text{ ч.}$$

Задания

1. Отказы торцевых уплотнений в основном вызываются недопустимой утечкой жидкости между уплотняющими кольцами вследствие их износа. Необходимо определить среднюю наработку до отказа торцевых уплотнений диаметром 160 мм и шириной кольца b , если известно, что средняя наработка до отказа торцевого уплотнения диаметром 90 мм и шириной кольца b составляет 2500 ч, а её коэффициент вариации равен 0,3. Условия эксплуатации (удельные нагрузки), материалы и технология изготовления одинаковые.

2. По результатам эксплуатации теплообменников с развальцованными трубами известно, что основной причиной их отказов является нарушение герметичности в местах развальцовки труб. При этом известно, что наработка на отказ теплообменника, имеющего 300 развальцовок, составляет 1200 ч, а коэффициент вариации равен 0,5.

Вновь сконструированный теплообменник имеет 150 развальцовок. Необходимо определить его наработку на отказ.

3. Провести расчёт надёжности и эффективности технической системы по следующим исходным данным:

объём $V = 5,6 \text{ м}^3$;

объёмная производительность $180 \text{ м}^3/\text{ч}$;

температура $t = 420^\circ \text{ С}$;

мощность привода $N = 12 \text{ кВт}$;

скорость вращения $n = 60 \text{ об/мин}$;

мешалка лопастная.

Расчетная схема состоит из шести последовательно соединённых элементов, отказ любого из них приводит к отказу аппарата.

Значения показателей безотказности и ремонтпригодности разрабатываемого аппарата приведены в табл. 4.13.

Значения показателей долговечности и ремонтпригодности, определённые на основании анализа структур ППР действующих аппаратов, приведены в табл. 4.14.

Рассчитать показатели надёжности и эффективности функционирования системы.

Таблица 4.13

Показатели надёжности элементов аппарата

Количество элементов	Нарработка на отказ, ч, T_i	Среднее время восстановления, ч, $T_{\text{вн}}$
1	40000	10
1	1500	22
1	100000	24
1	85	12
1	76	6
1	82	22

Система планово-предупредительного ремонта

Наименование показателя	Числовое значение
Ресурс между ремонтами	
– текущими $T_{рт}$, ч	1440
– средними $T_{рс}$, ч	8640
– капитальными $T_{рк}$, ч	34560
Продолжительность ремонтов	
– текущего $T_{пт}$, ч	32
– среднего $T_{пе}$, ч	120
– капитального $T_{пк}$, ч	168
Число капитальных ремонтов	2

4. Время работы элемента до отказа подчинено нормальному закону с параметрами $T_1 = 10000 \text{ часов}$, $\sigma = 4000 \text{ часов}$. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $P(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$ и T_{cp} для $t = 6000 \text{ часов}$.

Практическое занятие 3**Определение техногенного риска системы**

Цель – получить практические навыки в определении техногенного риска системы при использовании предварительного анализа опасностей и составления блок-схем безаварийной работы системы.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть практического задания.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–2.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения**1. Определение факторов риска технической системы**

При системном анализе техногенной опасности рассматривается опасность для человека, исходящая от технической системы. Исследуются все возможные отказы, риски и их последствия по отношению к человеку.

Риск – вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда.

Производственная опасность – наблюдаемое в процессе выполнения технологических операций (функционирования человеко-машинных систем) свойство таких систем представлять в естественных условиях реально предсказуемую возможность причинения ущерба.

Ущерб – такое изменение состояния технической системы, которое характеризуется нарушениями целостности, работоспособности или потерей других свойств ее компонентов или окружающей среды в результате происшествий или вредного влияния на них неизбежных энергетических (тепло, шум, ...) либо материальных (сажа, шлаки, ...) выбросов.

Общей характерной чертой практически всех рассматриваемых происшествий является то, что для их возникновения необходимо появление, как правило, не одной, а нескольких предпосылок, образующих в совокупности причинную цепь происшествия.

Начальную классификацию рисков можно провести в зависимости от основной причины возникновения рисков.

Природные риски – риски, связанные с проявлением стихийных сил природы: землетрясениями, наводнениями, подтоплениями, бурями и т. п.

Техногенные риски – риски, связанные с опасностями, исходящими от технических объектов.

Экологические риски – риски, связанные с загрязнением окружающей среды.

С точки зрения применения понятия риска при его анализе и управлении техногенной безопасностью важными категориями являются:

- *индивидуальный риск* – риск, которому подвергается индивидуум в результате воздействия исследуемых факторов опасности;
- *потенциальный территориальный риск* – пространственное распределение частоты реализации негативного воздействия определенного уровня;
- *социальный риск* – зависимость частоты событий, в которых пострадало на том или ином уровне число людей больше определенного, от этого определенного числа людей;
- *коллективный риск* – ожидаемое число смертельно травмированных в результате возможных аварий за определенный период времени;
- *приемлемый риск* – уровень риска, с которым общество в целом готово мириться ради получения определенных благ или выгод в результате своей деятельности.

2. Численное определение рисков

Пусть $R(t)$ – вероятность возникновения аварийной ситуации на отрезке времени $[0, t]$. Эта вероятность должна удовлетворять условию

$$R(T) \leq R, \quad (4.8)$$

где R – предельно допустимое (нормативное) значение риска возникновения аварийной ситуации.

Используем нормативное значение вероятности безотказной, т. е. безопасной, работы P , которая весьма близка к единице.

Функция риска на отрезке времени $[0, t]$ дополняет функцию безопасности $P(t)$ до единицы:

$$R(t) = 1 - P(t). \quad (4.9)$$

Интенсивность риска аварийной ситуации (удельный риск) аналогична интенсивности отказов:

$$r(t) = R'(t) / [1 - R(t)]. \quad (4.10)$$

Поскольку время t при оценке риска аварии исчисляются в годах, то $r(t)$ имеет смысл годового риска возникновения аварийной ситуации.

Средний годовой риск аварии:

$$r(t) = R(t) / T. \quad (4.11)$$

Для парка одинаковых технических объектов функция безопасности:

$$P_n(t) = P^n(t), \quad (4.12)$$

где n – численность парка одинаковых объектов (самолетов, станков и т. п.).

В этом случае функция риска

$$R_n(t) = 1 - [1 - R(t)]^n \approx n \cdot R(t). \quad (4.13)$$

Аналогично для удельного риска:

$$R_{ncp}(t) = n \cdot r(t); \quad (4.14)$$

$$r_{ncp}(t) = n \cdot r_{cp}(t). \quad (4.15)$$

Показатели риска промышленного изделия представлены в табл. 4.15.

Главным требованием является выявление основных опасностей, которое может быть осуществлено после установления определенных общих параметров:

1) материалы – сырье, исходные материалы, промежуточные материалы, продукция (продукты реакции), исходящие потоки газа или жидкости;

- 2) производственные операции (технологический процесс);
 3) местоположение проектируемой системы – размещение между производственными операциями, пространственные соотношения с другими системами.

Таблица 4.15

Показатели риска промышленного изделия

Показатели риска (ПР) и их определения	Обозначения ПР	Классифицирующие факторы
1	2	3
Риск номинальный собственный – вероятность того, что при нормальной работе без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	R_{np}	a, p
Риск номинальный комплексный – вероятность того, что при нормальной работе без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	R_{nc}	a, c
Риск функциональный собственный – вероятность того, что при отказе арматуры в процессе нормальной работы без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	R_{fp}	b, p
Риск функциональный комплексный – вероятность того, что при отказе арматуры в процессе нормальной работы без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	R_{fc}	b, c
Риск аварийный собственный – вероятность того, что при отказе арматуры вследствие чрезвычайных обстоятельств без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	R_{ep}	c, p
Риск аварийный комплексный – вероятность того, что при отказе арматуры вследствие чрезвычайных обстоятельств без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	R_{ec}	c, c
Риск дисфункциональный собственный – вероятность того, что при отказе арматуры вследствие неправильного ее применения без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	R_{dp}	d, p
Риск дисфункциональный комплексный – вероятность того, что при отказе арматуры вследствие неправильного ее применения без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	R_{dc}	d, c

Эти общие параметры должны затем рассматриваться поочередно в процессе использования контрольных перечней потенциальных опасностей. Например, контрольные перечни, разработанные для обследования большинства технологических установок, включают следующие опасности: пожар, взрыв, детонацию, токсичность, коррозию, радиацию, шум, вибрацию, ядовитый (вредный) материал, поражение электротоком, механическое повреждение.

Для отдельных процессов можно дополнительно рассматривать и другие опасности.

Когда потенциальные опасности рассматриваются поочередно применительно к общим параметрам, любая значимая комбинация может служить признаком большей опасности, которая затем должна рассматриваться в соответствии с перечнем принципиальных решений.

Структура качественного исследования при предварительном анализе опасностей (ПАО) выглядит следующим образом.

1. Система, подсистема или элемент – аппаратура, механизм или функциональный элемент, технологические операции, подвергаемые анализу.

2. Ситуация – соответствующая фаза работы аппаратуры, механизма, элемента или вид технологической операции.

3. Опасный элемент – анализируемый элемент аппаратуры, механизма или технологическая операция, являющиеся по своей природе опасными.

4. Причина, вызывающая опасное состояние, – нежелательное событие или ошибка, которые могут быть причиной того, что опасный элемент вызовет определенное опасное состояние.

5. Опасные условия – результат взаимодействия элементов в системе и система в целом, при котором может быть создано опасное состояние.

6. Событие, вызывающее опасные условия, – нежелательные события или дефекты, которые могут вызвать опасное состояние, ведущее к определенному типу возможной аварии.

7. Потенциальная авария. Рассматривается любая возможная авария, которая возникает в результате определенного опасного состояния.

8. Последствия. Рассматриваются возможные последствия потенциальной аварии в случае ее возникновения.

9. Класс опасности. Выполняется качественная оценка потенциальных последствий для каждого опасного состояния в соответствии с нижеприведенными критериями.

Класс I – безопасный: состояние, связанное с ошибками персонала, недостатками конструкции или ее несоответствием проекту, а также неправильной работой, которое не приводит к существенным нарушениям и не вызывает повреждения оборудования и несчастных случаев с людьми.

Класс II – граничный (предельно допустимый): состояние, связанное с ошибками персонала, недостатками конструкции, ее неправильным функционированием или несоответствием проекту, которое приводит к нарушениям в работе, но может быть компенсировано или взято под контроль без повреждений оборудования или несчастных случаев с персоналом.

Класс III – критический: состояние, связанное с ошибками персонала, недостатками конструкции или несоответствием проекту, а также неправильным ее функционированием, приводящее к существенным нарушениям в работе, повреждению оборудования и создающее опасную ситуацию, требующую немедленных мер по спасению персонала и оборудования.

Класс IV – катастрофический: состояние, связанное с ошибками персонала, недостатками конструкции или ее несоответствием проекту, а также неправильным ее функционированием, полностью нарушающее работу и приводящее к последующему разрушению системы и/или гибели или массовому травмированию персонала.

10. Мероприятия для предотвращения аварии. Рекомендуемые защитные меры для исключения или ограничения выявленных опасных состояний и/или потенциальных аварий – требования к элементам конструкций, введение защитных приспособлений, изменение конструкций, введение инструкций для персонала и другие меры.

Результаты качественного анализа при проведении предварительного анализа опасностей (ПАО) заносятся в таблицу. Содержание этой формы носит описательный характер с перечислением как отдельных событий, так и вводимых корректирующих действий, которые могут быть предприняты. По усмотрению исследователя пункты таблицы могут соответствовать приведенной структуре или несколько изменяться – все зависит от поставленных задач, рассматриваемой системы и условий окружающей среды.

Пример 1. Продемонстрируем принципы проведения предварительного анализа опасностей с использованием ключевых слов на примере установки, в которой происходит реакция между химическими веществами *A* и *B* с получением продукта *C*.

Процесс может осуществляться различными способами, а его ход обычно представляется в описательной или графической форме. Чаще всего он изображается в виде схемы (рис. 4.2) или карты

технологического процесса. В рассматриваемом примере предусмотренные проектом характеристики производственного процесса частично описаны в технологической карте и частично отражены в требовании управления технологическим процессом, определяющим подачу вещества *A* при какой-то заданной скорости.

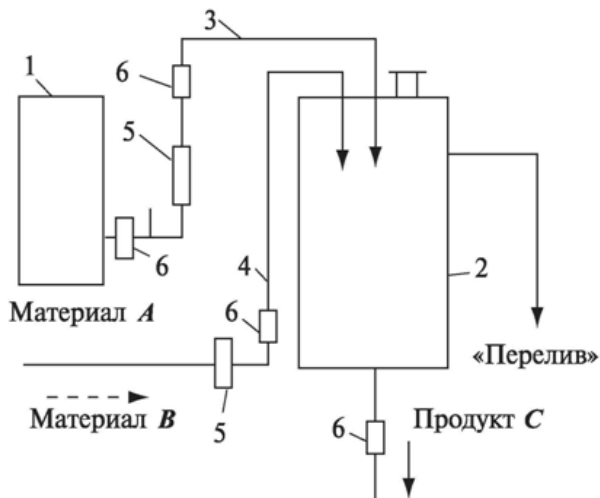


Рис. 4.2. Схема технологической установки:
 1 – расходная емкость; 2 – реактор;
 3, 4 – трубопроводы продуктов *A* и *B*; 5 – насосы;
 6 – запорный клапан

Пример простой технологической карты

Вещество *A*.

Вещество *B*.

Получаемый продукт *C*.

Реакция $A + B = C$.

Предположим, что химия технологического процесса такова, что концентрация исходного материала *A* никогда не должна быть ниже концентрации материала *B* во избежание взрыва.

Проектом определено, как должен работать участок трубопровода, по которому осуществляется перемещение материала *A*.

Первое из появляющихся отклонений возникает при использовании ключевых слов «*НЕ*» или «*НЕТ*» применительно к проектному требованию. В данном случае получится: **«НЕ ПЕРЕМЕЩАЕТСЯ *A*»**.

Затем рассматривается схема технологического процесса для установления причин, которые могли бы полностью прекратить подачу *A*.

Обратимся к рис. 4.2. Начнем с трубопровода, идущего от всасывающего патрубка насоса, который перекачивает исходный материал A до того места, где он поступает в реактор.

Причинами прекращения подачи A могут быть следующие условия.

1. Расходный резервуар пуст.
2. Не действует насос из-за механической поломки, повреждения электросети или отключения насоса и т. д.
3. Разрыв трубопровода.
4. Закрыт запорный клапан.

Очевидно, что, по крайней мере, некоторые из этих причин являются возможными и поэтому можно заключить, что они вызывают существенное отклонение $A + B = C$.

Затем анализируются последствия. Полное прекращение доступа потока материала A скоро приведет к тому, что количество материала B в реакторе будет превышать количество материала A , что может привести к опасности взрыва. Таким образом, выявлены опасности в конструкции, и они отмечены для дальнейшего рассмотрения.

Следующее ключевое слово: **«БОЛЬШЕ»**. Отклонение: **«В РЕАКТИВНЫЙ СОСУД ПОСТУПИЛО БОЛЬШЕ ВЕЩЕСТВА A »**.

Причиной этому могут быть технические характеристики насоса, которые при определенных обстоятельствах приведут к увеличению скорости потока одного из веществ. Если это вполне объяснимая причина, то рассматривают нижеперечисленные последствия:

- 1) в результате реакции в реактивном сосуде образуется вещество C , загрязненное избытком вещества A , переходящее в таком виде в следующую стадию процесса;
- 2) избыточный поток в реактивный сосуд предполагает, что часть вещества будет удалена через сливное устройство.

Для решения вопроса о степени опасности таких обстоятельств нужна дополнительная информация.

Очередное ключевое слово **«МЕНЬШЕ»**. Отклонение: **«В РЕАКТИВНЫЙ СОСУД ПОСТУПИЛО МЕНЬШЕ ВЕЩЕСТВА A »**.

Причины этого события несколько отличаются от причин, вызвавших отклонение от режима в результате прекращения подачи A .

1. Запорный клапан открыт не полностью.
2. Частичная закупорка трубопровода.
3. Насос не справляется с подачей жидкости из-за снижения своих рабочих характеристик.

Следствие аналогично тому, которое явилось результатом полного прекращения потока, и поэтому потенциальная опасность — это возможность взрыва.

Затем оставшиеся ключевые слова по очереди применяются к проекту конструкции этой части, для того чтобы обеспечить исследование всех возможных отклонений.

После проверки трубопровода, по которому в реактор поступает материал *A*, он отмечается на карте технологического процесса как прошедший проверку. Затем выбирается следующая часть конструкции для исследования, и это может быть трубопровод для подачи исходного материала *B* в реактор. Это повторяется (рис. 4.2) для каждой части конструкции, каждого трубопровода, вспомогательных устройств, например мешалок, любых средств обслуживания реактора (подача тепла и холода) и самого реактора. Вот почему этот метод иногда называют *методом последовательной экспертизы*.

Для системного анализа безопасности и риска могут использоваться так называемые структурные модели, которые представляют в виде блок-схем или графов, а исходную информацию задают в виде известных значений вероятностей безаварийной работы элементов, интенсивностей технического риска.

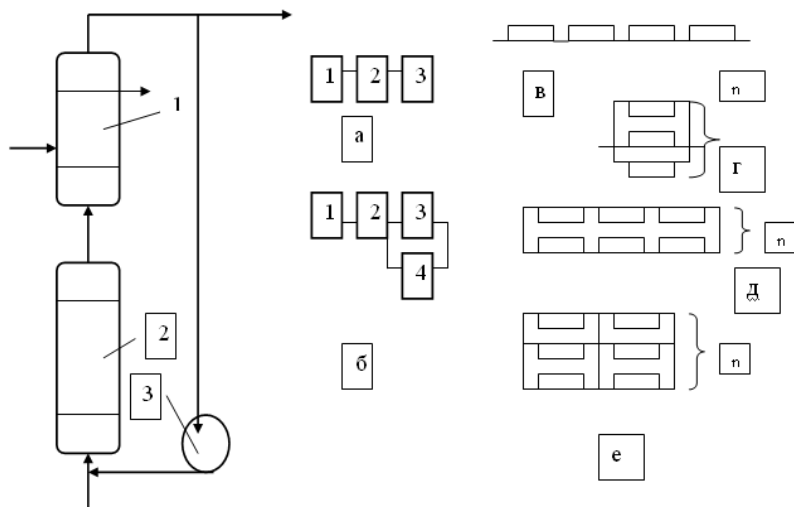


Рис. 4.3. Технический объект, структурные схемы и блок-схемы простейших систем при расчете технического риска. Соединения элементов:
 а, в) последовательное; г) параллельное; б, д, е) смешанное; 1 — реактор;
 2 — теплообменник; 3 — циркулярный насос; 4 — резервный насос

Рассмотрим объект, состоящий из реактора 1, теплообменника 2 и циркулярного насоса 3 (рис. 4.3), который может быть представлен в случае независимости отказов элементов объекта в виде блок-схемы, изображенной на рис. 4.3,а. Если в объекте дополнительно установить резервный насос 4, то будет иметь место блок-схема, изображенная на рис. 4.3,б.

Если элементы взаимодействуют таким образом (как на блок-схеме рис. 4.3,а и 4.3,б), что переход в аварийное состояние любого из них приводит к аварийному отказу системы, то соединение элементов называют последовательным. Безаварийное состояние системы в этом случае может рассматриваться как случайное событие, равное пересечению (произведению) независимых событий – безаварийной работы каждого из элементов. Следовательно, функция безопасности $S(t)$ системы, согласно теореме умножения независимых событий, равна произведению функций безопасности элементов:

$$S(t) = \prod_{k=1}^m S_k(t), \quad (4.16)$$

где m – число элементов системы; $S_1(t) \dots S_m(t)$ – функции безопасности каждого из элементов.

Если элементы системы одинаковы, т. е. $S_1(t) = S_m(t) = \dots = S_0(t)$, то вместо (4.16) имеем

$$S_1(t) = S_0^m(t). \quad (4.17)$$

В случае экспоненциального закона вероятности выражения для функции безопасности $S(t)$, т. е.

$$S(t) = \exp(-m\lambda_0 t). \quad (4.18)$$

Эти соотношения отражают известное положение о том, что если элементы взаимодействуют по схеме последовательного соединения, то показатели безопасной работы системы ниже соответствующих показателей любого из ее элементов. При этом с увеличением числа элементов показатели системы быстро падают. Если число m велико, то практически невозможно создать систему, обладающую высокой безопасностью.

Один из способов повышения безопасности систем – метод резервирования, заключающийся во введении в систему дополнительных элементов или подсистем сверх количества, минимально необходимого для выполнения заданных функций (как это сделано с резервным насосом рис. 4.3,б).

Блок-схема простейшего способа резервирования показана на рис. 4.3,г. Вместо одного элемента, достаточного для выполнения

определенных функций, система состоит из n элементов. Предполагается, что аварийные отказы элементов – независимые события, а отказ системы происходит лишь в том случае, если откажут все n элементов. Такое соединение называют параллельным. Вероятность перехода системы в аварийное состояние равна произведению вероятностей отказов элементов. Следовательно, функция безопасности $S(t)$ системы:

$$S(t) = 1 - \prod_{k=1}^n [1 - S_k(t)]. \quad (4.19)$$

Если элементы системы одинаковы, т. е. $S_1(t) = S_n(t) = \dots = S_0(t)$, получаем:

$$S = 1 - (1 - S_0)^n. \quad (4.20)$$

В случае экспоненциального закона вероятности безаварийной работы элементов:

$$S(t) = 1 - (1 - \exp(-\lambda_0 t))^n. \quad (4.21)$$

При высказанных предположениях о независимости отказов элементов безопасность системы с параллельным соединением элементов возрастает с увеличением кратности резервирования.

На рис. 4.3,д представлена блок-схема, в которой каждая подсистема резервирована $(n-1)$ раз. Функция безопасности системы

$$S(t) = 1 - [1 - \prod_{k=1}^m S_k(t)]^n. \quad (4.22) \quad (4.22)$$

На блок-схеме, изображенной на рис. 4.3,е, показан способ раздельного резервирования. На этой схеме каждый элемент резервируется $(n-1)$ раз, после чего подсистемы соединяют последовательно. В этом случае

$$S(t) = \prod_{k=1}^m [1 - (1 - S_k(t))^n]. \quad (4.23)$$

Функция риска является обратной функции безопасности системы и определяется по формуле

$$Q(R) = 1 - \exp(-\lambda t). \quad (4.24)$$

Блок-схемы рис. 4.3,б–е соответствуют случаям, когда все резервные элементы находятся в рабочем состоянии. Наряду с этим можно строить схемы, в которых резервные элементы включаются в работу только в случае отказа очередного элемента или резервные элементы работают в облегченном дежурном режиме.

Задания

1. Система вентиляции находится в формовочном цехе литейного производства ОАО «СМиК» г. о. Тольятти на участке сушки форм. В формовочном цехе в воздушную среду рабочих зон могут

выделяться газы, пыль, а также избыточное конвекционное и лучистое тепло от сушильных печей. В формовочных отделениях применяют механическую приточную вентиляцию, которая сочетается с естественной, осуществляемой через фрамуги фонарей на крыше и оконные проемы. Общий механический приток воздуха сосредоточивают на участках формовки и сборки форм, на смежных участках заливки и выбивки форм устраивают местную механическую вытяжную вентиляцию.

Местная вытяжная вентиляция применяется для удаления пыли непосредственно от литейной формы. Вентиляция работает за счет электродвигателя.

Используя принцип предварительного анализа опасностей, провести качественный анализ опасностей для системы вентиляции (рис. 4.4).

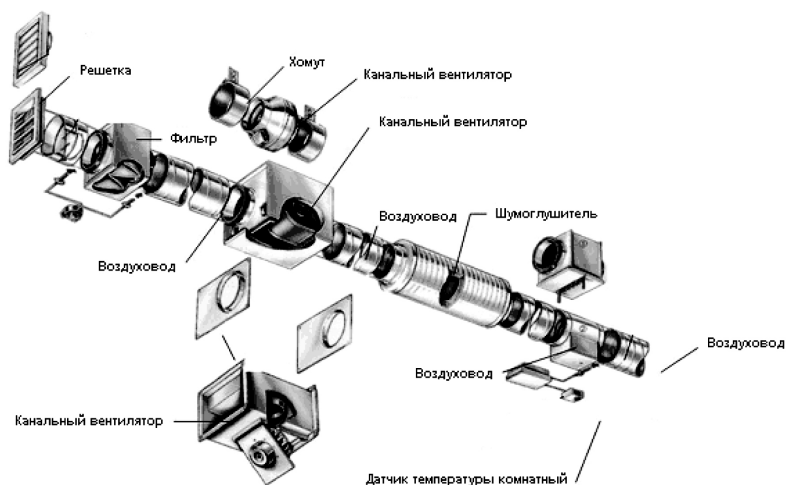


Рис. 4.4. Схема вентиляционной системы

Составить блок-схему для оценки вероятности безаварийной работы системы вентиляции.

2. Одной из важных задач в ремонте оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий является ремонт центробежных насосов и теплообменных аппаратов, входящих в состав технологических установок (рис. 4.5).

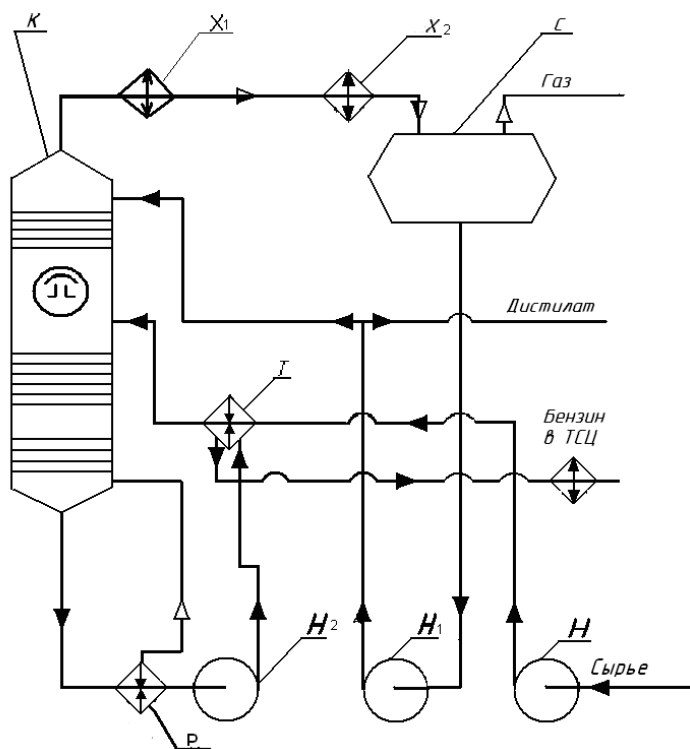


Рис. 4.5. Схема технологического узла ректификации установки Л-16-1 цеха № 9 НПЗ

Таблица 4.16

Перечень оборудования технологической установки

Обозначения	Наименование	Количество
К	Колонна ректификационная	1
X_2	Водяной холодильник	1
С	Сепаратор	1
Р	Ребойлер	1
Н	Насос сырьевой	1
N_1, N_2	Насос центробежный	2
X_1	Воздушный холодильник	1
Т	Теплообменник	1

Конденсатор предназначен для охлаждения пропан-бутановой фракции (дистиллят) на установке Л-16-1 цеха № 9 НПЗ ОАО «Салаватнефтеоргсинтез» в систему охлаждения установки.

Центробежный насос марки 2НГК 4x1 цеха № 9 НПЗ ОАО «Салаватнефтеоргсинтез» предназначен для перекачки сырья с температурой до 100° С в систему охлаждения установки.

Работа насоса и конденсатора в технической схеме установки заключается в следующем (рис. 4.5): сырье подается в колонну насосом центробежного типа через теплообменник, где нагревается за счет отводимого из колонны остатка. Легкая часть сырья (дистиллят) выводится газом. Пары дистиллята охлаждаются и конденсируются в конденсаторе воздушного охлаждения и водяном конденсаторе, поступают в сепаратор, где отделяются газообразные углеводы. Газы выводятся из сепаратора в общую линию, дистиллят забирают насосом и направляются частично на верх колонны в качестве орошения, а балансовое количество либо в резервуарный парк, либо на дальнейшую переработку. Тяжелая часть сырья (остаток) выводится с низа колонны через ребойлер, подогреваемый водяным паром. Часть остатка испаряется в виде горячих паров, а часть возвращается в колонну для поддержания необходимой температуры низа колонны. Балансовая часть остатка забирается из ребойлера насосом и откачивается через сырьевой теплообменник на дальнейшую переработку или в парк.

Составить блок-схему для оценки вероятности безаварийной работы системы технологического узла ректификации установки Л-16-1 цеха № 9 нефтеперерабатывающего завода.

Практическое занятие 4

Оценка техногенного риска системы

Цель – получить практические навыки оценки риска технической системы.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть практического задания.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–4.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Разработан метод оценки риска возникновения аварии на основании методов теории надежности. Для выявления причинно-следственных связей между случайными событиями, приводящих

к аварии, и оценки риска используются вероятностные методы анализа «деревьев отказов». Произведена оценка риска (вероятности) возникновения техногенных аварий и их последствий для конкретного объекта. Реализована стратегия управления риском, основанная на современных информационных технологиях.

Для повышения эффективности декларирования промышленной безопасности необходимо активизировать деятельность в следующих направлениях:

- внедрение методов качественного анализа опасностей и инженерных методов оценки риска;
- установление критериев приемлемого риска и безопасности;
- разработка методик, учитывающих основные стадии и эффекты аварийного процесса и объединенных на основе общих параметров в комплекс взаимосвязанных методик – экспертную систему;
- разработка методик «прямого численного» моделирования аварийных процессов, основанных на численном решении уравнений, описывающих процессы разрушения технических устройств и условия выброса опасных веществ в окружающее пространство;
- оценка ущерба от аварий на опасных типовых производственных объектах;
- развитие информационной базы и методов сбора и анализа данных об инцидентах, авариях на опасных производственных объектах.

Одной из основных целей оценки риска аварии является получение достоверных количественных показателей, пригодных для эффективного управления процессом обеспечения промышленной безопасности на объектах повышенной опасности (ОПО). Это позволит более обоснованно оценивать риск аварии и соответственно предлагать обоснованные рекомендации, направленные на обеспечение промышленной безопасности ОПО.

В процессе управления безопасностью и риском в соответствии с его сущностью и функциональным смыслом могут быть выделены три стадии:

- 1) анализ безопасности и риска, предусматривающий идентификацию и исследование источников опасности, моделирование процессов возможного воздействия, оценку возможного ущерба и уровней риска;
- 2) оценка риска, состоящая в сравнении расчетных или фактических уровней риска с научно обоснованными социально осознанными, называемыми приемлемыми уровнями риска;
- 3) выработка и принятие нормативно-правовых актов и управленческих решений по мерам, обеспечивающим снижение

возможной опасности, установление, поддержание и восстановление приемлемого уровня безопасности и риска человека и объектов окружающей среды.

Оценка риска позволяет представить количественное выражение опасности через величину риска и включает в себя оценку вероятности события в сочетании с анализом.

Основные задачи этапа оценки риска связаны:

- с определением частот возникновения иницирующих и всех нежелательных событий;
- оценкой последствий возникновения нежелательных событий;
- обобщением оценок риска.

Для определения частоты нежелательных событий необходимо использовать:

- статистические данные по аварийности и надежности технологической системы, соответствующие специфике опасного производственного объекта;
- экспертные оценки путем учета мнения специалистов в данной области;
- анализ протекания аварии с целью определения необходимой вероятности;
- логические методы анализа «деревьев событий», «деревьев отказов», имитационные модели возникновения аварий в человеко-машинной системе.

Для оценки последствий необходимо определить физические эффекты нежелательных событий, уточнить объекты, которые могут быть подвергнуты опасности. При анализе возможных последствий аварий необходимо использовать модели аварийных процессов и критерии поражения, а также учитывать ограничения применяемых моделей. Обобщенная оценка риска аварий должна отражать состояние промышленной безопасности с учетом показателей риска от всех нежелательных событий, которые могут произойти на опасном производственном объекте, и основываться на результатах:

- интегрирования показателей рисков всех нежелательных событий (сценариев аварий) с учетом их взаимного влияния;
- анализа неопределенности и точности полученных результатов;
- анализа соответствия условий эксплуатации требованиям промышленной безопасности и критериям приемлемого риска.

При обобщении оценок риска следует проанализировать неопределенность и точность полученных результатов. Основными

источниками неопределенностей являются неполнота информации по надежности оборудования и ошибки человека, принимаемые предположения и допущения используемых моделей аварийного процесса. Источники неопределенности следует идентифицировать (например, человеческий фактор) и оценить.

Оценка риска включает оценку вероятности события в сочетании с анализом последствий и позволяет представить количественное выражение опасности через величину риска. Прогнозирование аварийных ситуаций возможно на основе статистики и дискретного распределения Пуассона, часто применяемого к редким событиям и природным явлениям.

Закон надежности имеет вид:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right], \quad (4.25)$$

где величина $\lambda(t) = -1/P(t) \cdot d/dt \cdot P(t)$ называется интенсивностью отказов, равная вероятности того, что после безотказной работы до момента времени t авария произойдет в последующем малом отрезке времени.

В период нормального функционирования этот закон принимает вид экспоненциального распределения:

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (4.26)$$

При функции надежности в виде $P(t) = \exp(-\lambda t)$ частота отказов в системе однотипных объектов (поток случайных событий) соответствует дискретному распределению Пуассона:

$$P(m, \lambda \tau) = \frac{(\lambda \tau)^m}{m!} \exp(-\lambda \tau), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \lambda \tau > 0. \quad (4.27)$$

Аварии на временном интервале τ ($t, t + \tau$) произойдут m раз с вероятностью $P(m, \lambda \tau)$, а отсутствие аварийных ситуаций – с вероятностью:

$$P(0, \lambda \tau) = \exp(-\lambda \tau). \quad (4.28)$$

Вероятность возникновения хотя бы одной аварии представляет оценку риска аварии на объекте за период τ :

$$Q = 1 - P(0, \lambda \tau) = 1 - \exp(-\lambda \tau). \quad (4.29)$$

Для оценки вероятности хотя бы одной аварии среди N объектов за время τ указанное выражение примет вид

$$Q = 1 - \exp(-N \lambda \tau). \quad (4.30)$$

Параметр потока аварий λ иногда называют техническим риском, во многих случаях он служит самостоятельным оценочным

показателем опасности возникновения аварии и вычисляется с помощью выражения

$$\lambda = \frac{n}{N \cdot \Delta \tau}. \quad (4.31)$$

Угроза жизни человека при аварии оценивается индивидуальным риском:

$$\lambda_{\text{инд}} = \frac{n}{N \cdot \Delta \tau} \cdot \frac{m_{\text{гиб}}}{m_{\text{раб}}}, \quad (4.32)$$

где n – число объектов, на которых произошла авария за период $\Delta \tau$; N – число эксплуатируемых объектов за тот же период; $m_{\text{гиб}}$ – среднее число погибших на одном объекте при аварии; $m_{\text{раб}}$ – среднее число работающих на одном объекте.

Крупные аварии характеризуются комбинацией случайных событий, происходящих с различной частотой на разных стадиях возникновения и развития аварии. Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы анализа «деревьев отказов».

Задания

1. Найти функцию риска системы (рис. 4.3,з практического занятия 3), состоящей из параллельно соединенных элементов, по формуле (число элементов – 4, время безаварийной работы элементов распределено по экспоненциальному закону с интенсивностями λ : 0,15; 0,16; 0,27; 0,28).

2. Определить вероятность риска возникновения одного землетрясения в течение 10 лет, если в среднем за 100 лет в данном районе происходят три сильных землетрясения.

3. Даны токарные станки в количестве 6 штук. Определить риск возникновения аварии, вероятность безотказной работы двумя способами, сравнить полученные результаты. При условии, что период определения риска 40 лет, средний годовой риск возникновения аварии (поломки) $r_{\text{cp}}(t) = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$.

4. Построить график функции технического риска системы $Q(R)(t)$ в зависимости от времени, используя данные табл. 4.17.

Таблица 4.17

Исходные данные

λ	0,3	0,278	0,16	0,15	0,14	0,18
t	0	5	10	15	20	25

Практическое занятие 5

Расчет количественных показателей надежности восстанавливаемых объектов методом марковских процессов

Цель — освоить методику расчета количественных показателей надежности восстанавливаемых объектов методом марковских процессов.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть практического задания.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–2.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Для расчета количественных показателей надежности восстанавливаемых объектов применяют различные методы. Некоторые из них уже устоялись, другие продолжают развиваться, третьи только зарождаются. Из наиболее употребляемых в настоящее время методов можно назвать следующие: методы, основанные на использовании классической теории вероятностей (например, логико-вероятностный метод); методы, основанные на использовании теории массового обслуживания (в частности, метод пространства состояний); методы, основанные на использовании теории графов.

Следует отметить, что деление методов расчета достаточно условно, т. к. в пределах каждого метода могут использоваться разделы из других методик.

Для того чтобы рассчитать надежность системы методом пространства состояний, сначала рассматривают состояние системы, которое определяется состоянием каждого элемента: элемент либо работает, либо отказал, или находится еще в каком-либо состоянии. Состояния такой системы под воздействием потоков отказов и восстановлений могут меняться во времени. В общем случае можно говорить о некоторой системе, которая в процессе функционирования может менять свои состояния. Все возможные состояния системы образуют пространство состояний.

При использовании метода пространства состояния для описания процесса переходов системы из одного состояния в другое применяют модели Маркова. Обосновать применение этого метода можно при следующих предположениях: 1) если каждый из элементов системы имеет экспоненциальное распределение времени безотказной работы; 2) вероятность перехода из одного состояния в другое не должно зависеть от предыстории системы, т. е. от состояний, в которых система находилась ранее. На практике эти

предположения могут не выполняться, но все равно применяют указанные предположения.

Случайный процесс называется марковским, если для любого момента времени t_i вероятность любого состояния системы в будущем (при $t > t_i$) зависит только от её состояния S_i в момент t_i и не зависит от того, когда и как система пришла в состояние S_i . (не зависит от предыстории системы). Марковский процесс с дискретными состояниями и дискретным временем называют цепью Маркова.

В теории надежности широкое применение находят марковские процессы с дискретными состояниями и непрерывным временем. Для непрерывного марковского процесса сумма вероятностей состояний для любого промежутка времени равна единице:

$$\sum_i p_i(t) = 1. \quad (4.33)$$

При изучении случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем в теории надежности считают, что переходы системы из одного состояния в другое происходят под воздействием потоков отказов и восстановлений, а переходы из состояния S_i в состояние S_j описывают при помощи их интенсивностей $\lambda_{ij}(t)$.

Процесс изменения состояний можно проиллюстрировать с помощью графа состояний системы (рис. 4.6). Граф задается множеством точек или вершин и множеством линий или ребер, соединяющих между собой все или часть точек.

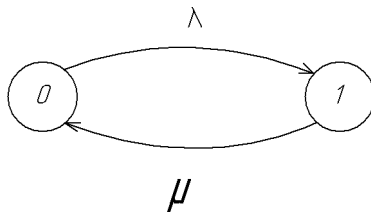


Рис. 4.6. Граф состояний системы

Если ребра ориентированы, что обычно показывается стрелкой, то они называются дугами, и граф с такими ребрами называется ориентированным, если ребра не имеют ориентации, то граф называется неориентированным. Вершины графа обозначаются номерами состояний (в простейшем случае таких состояний будет два: 0 — система работоспособна, 1 — система в состоянии отказа), дуги графа показывают направления переходов системы из одного состояния в другое.

Пример расчета показателей надежности при применении метода пространства состояний для описания процесса переходов системы из одного состояния в другое с использованием модели Маркова.

Провести расчет надежности системы, состоящей из двух элементов (рис. 4.7), если они могут находиться в четырех состояниях. Состояние S_0 — два элемента «а» и «б», входящие в систему, работоспособны; состояние S_1 — элемент «а» отказал, элемент «б» работает; S_2 — элемент «а» работает, «б» отказал; S_3 — оба элемента «а» и «б», входящие в систему, находятся в отказовом состоянии. Время безотказной работы и время восстановления имеют экспоненциальное распределение с параметрами λ и μ соответственно.

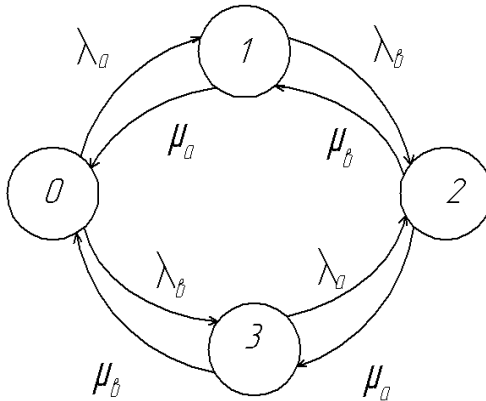


Рис. 4.7. Граф состояний системы

Решение. Для графа состояний составляется система дифференциальных уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} -(\lambda_a + \lambda_b)p_0(t) + \mu_a p_1(t) + \mu_b p_2(t) = \frac{dp_0(t)}{dt} \\ \lambda_a p_0(t) - (\lambda_b + \mu_a)p_1(t) + \mu_b p_3(t) = \frac{dp_1(t)}{dt} \\ \lambda_b p_0(t) - (\lambda_a + \mu_b)p_2(t) + \mu_a p_3(t) = \frac{dp_2(t)}{dt} \\ \lambda_b p_1(t) + \lambda_a p_2(t) - (\mu_a + \mu_b)p_3(t) = \frac{dp_3(t)}{dt} \end{array} \right. \quad (4.34)$$

Найдем стационарные значения вероятностей, для этого от дифференциальных уравнений переходим к алгебраическим:

$$\begin{cases} -(\lambda_a + \lambda_b)p_0 + \mu_a p_1 + \mu_b p_2 = 0 \\ \lambda_a p_0 - (\lambda_b + \mu_a)p_1 + \mu_b p_3 = 0 \\ \lambda_b p_0 - (\lambda_a + \mu_b)p_2 + \mu_a p_3 = 0 \\ \lambda_b p_1 + \lambda_a p_2 - (\mu_a + \mu_b)p_3 = 0. \end{cases} \quad (4.35)$$

Заменяя одно из этих уравнений выражением $p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1$, получаем систему из трех независимых уравнений. Решение системы записывается в виде:

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{\mu_a \mu_b}{(\lambda_a + \mu_a)(\lambda_b + \mu_b)}; \\ p_1 &= \frac{\lambda_a \mu_b}{(\lambda_a + \mu_a)(\lambda_b + \mu_b)}; \\ p_2 &= \frac{\lambda_b \mu_a}{(\lambda_a + \mu_a)(\lambda_b + \mu_b)}; \\ p_3 &= \frac{\lambda_a \lambda_b}{(\lambda_a + \mu_a)(\lambda_b + \mu_b)}. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Так как $\lambda = 1/T$, $\mu = 1/T_b$, то, подставляя эти значения в формулу для нахождения p_0 , получаем $p_0 = K_{ia} K_{ib}$.

Остальные значения вероятностей выразить через коэффициенты готовности и вынужденного простоя самостоятельно.

Инженерная методика расчета показателей надежности

Основными допущениями метода, основанного на теории марковских процессов, являются:

- время безотказной работы и время восстановления каждого элемента, входящего в систему, имеют экспоненциальное распределение вероятностей;
- функционирование системы контролируется непрерывно, т. е. момент отказа обнаруживается немедленно после его возникновения;
- восстановление элемента начинается сразу после его отказа при наличии свободной бригады, обслуживающей данный элемент;

при отсутствии свободной ремонтной бригады отказавший элемент становится в очередь на обслуживание.

Метод позволяет рассчитать надежность невосстанавливаемых и восстанавливаемых, нерезервированных и структурно-резервированных технических систем при любом состоянии резерва (ненагруженном, облегченном, нагруженном), при любом количестве ремонтных бригад и произвольной дисциплине обслуживания с учетом сделанных ранее допущений. Метод позволяет вычислять следующие характеристики надежности систем: вероятность безотказной работы, среднее время безотказной работы, функцию и коэффициент готовности, наработку на отказ, среднее время восстановления.

Инженерная методика анализа надежности технической системы, основанная на теории марковских процессов, состоит из следующих этапов.

1. *Формулировка понятия «отказ» и представление исходных данных*

Отказ – понятие субъективное, поэтому его определение для конкретной системы согласуется с заказчиком. Исходными данными для расчета показателей надежности являются: структурная схема системы (схема расчета надежности), интенсивности отказов и восстановлений каждого элемента, количество ремонтных бригад, приоритет обслуживания, время непрерывной работы, начальное состояние процесса функционирования системы.

2. *Построение графа состояний*

Порядок построения графа состояний приведен выше. В соответствии с принятым понятием отказа множество всех состояний E разбивается на множество работоспособных состояний E^+ и множество отказовых состояний E^- . Если система работает только до первого отказа и вычисляются показатели $P(t)$ и T_1 , то в графе отсутствуют ветви из всех отказовых состояний.

3. *Составление по графу системы линейных дифференциальных и/или алгебраических уравнений*

По виду графа формально записывается система линейных дифференциальных уравнений для вероятностей $p_i(t)$ пребывания системы в момент времени t в состоянии i . Проверяется правильность составления системы дифференциальных уравнений: если сумма правых частей равна нулю, то считается, что система составлена правильно.

Для определения вероятности безотказной работы следует ограничиться составлением уравнений только для исправных состояний системы.

4. *Решение систем уравнений и определение вероятностей состояний системы*

Вероятности состояний $p_i(t)$ определяются путем решения системы любым из известных математических методов. Часто бывает удобно использовать метод преобразования Лапласа.

5. *Вычисление требуемых показателей надежности системы.*

Задания

1. На рис. 4.8 представлен граф состояний системы, ветвям которого приписаны постоянные интенсивности перехода из состояния в состояние. В момент времени $t = 0$ система находилась в состоянии S_0 . Требуется построить математическую модель для нестационарного и стационарного режима функционирования системы.

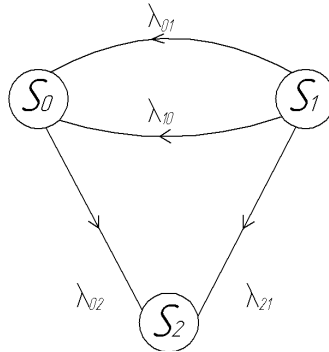


Рис. 4.8. Граф состояний системы

2. Для графа, представленного на рис. 4.9, рассчитать стационарные значения вероятностей для трех состояний. Состояние S_0 — два элемента, входящие в систему, работоспособны; состояние S_1 — один из элементов отказал; S_2 — оба элемента, входящие в систему, находятся в отказовом состоянии. Время безотказной работы $T = 100$ часов и время восстановления $T_B = 10$ часов имеют экспоненциальное распределение с параметрами λ и μ соответственно.

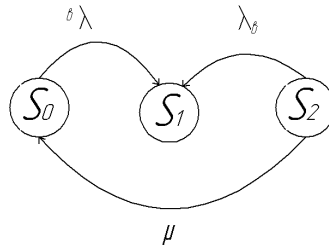


Рис. 4.9. Граф состояний системы

Практическое занятие 6

Количественный анализ надежности технической системы

Цель — овладеть навыками проведения количественного анализа надежности и риска технической системы.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть практического задания.
2. В соответствии с данными выполнить задание 1 (по вариантам).
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Для невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий понятие наработки различается: в первом случае подразумевается наработка до первого отказа (он же является и последним отказом), во втором — между двумя соседними во времени отказами (после каждого отказа производится восстановление работоспособного состояния). Математическое ожидание случайной наработки T является характеристикой безотказности и называется средней наработкой на отказ (между отказами).

$$M[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = T_{cp}. \quad (4.37)$$

В (4.37) через t обозначено текущее значение наработки, $af(t)$ — плотность вероятности ее распределения.

Вероятность безотказной работы — вероятность того, что в пределах заданной наработки t отказ объекта не возникнет:

$$p(t) = \text{Вер}(T \geq t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (4.38) \quad (4.38)$$

Вероятность противоположного события называется вероятностью отказа и дополняет вероятность безотказной работы до единицы:

$$q(t) = \text{Вер}(T \leq t) = 1 - p(t) = F(t). \quad (4.39)$$

В (4.38) и (4.39) $F(t)$ есть интегральная функция распределения случайной наработки t . Плотность вероятности $f(t)$ также является показателем надежности, называемым частотой отказов:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d[1 - p(t)]}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}. \quad (4.40)$$

Из (4.40) очевидно, что она характеризует скорость уменьшения вероятности безотказной работы во времени.

Интенсивностью отказов называют условную плотность вероятности возникновения отказа изделия при условии, что к моменту t отказ не возник:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} = -\frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt}. \quad (4.41)$$

Интегрируя (4.41), легко получить:

$$p(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]. \quad (4.42)$$

Это выражение, называемое основным законом надежности, позволяет установить временное изменение вероятности безотказной работы при любом характере изменения интенсивности отказов во времени. В частном случае постоянства интенсивности отказов $\lambda(t) = \lambda = const$ (4.42) переходит в известное в теории вероятностей экспоненциальное распределение:

$$0,322 \cdot 10^{-6}. \quad (4.43)$$

Поток отказов при $\lambda(t) = const$ называется простейшим и именно он реализуется для большинства РЭС в течение периода нормальной эксплуатации от окончания приработки до начала старения и износа.

Подставив выражение плотности вероятности $f(t)$ экспоненциального распределения (4.43) в (4.37), получим:

$$P_{12} = P_{13} = P_{14} = P_{15}, \quad (4.44)$$

т. е. при простейшем потоке отказов средняя наработка T_0 обратна интенсивности отказов λ . С помощью (4.43) можно показать, что за время средней наработки, $t = T_0$, вероятность безотказной работы изделия составляет $1/e$. Часто используют характеристику, называемую γ -процентной наработкой, – время, в течение которого отказ не наступит с вероятностью γ (%):

$$T_\gamma = -\frac{\ln P_\gamma}{\lambda} = -T_0 \ln P_\gamma, P_\gamma = \frac{\gamma}{100}. \quad (4.45)$$

Выбор параметра для количественной оценки надежности определяется назначением, режимами работы изделия, удобством применения в расчетах на стадии проектирования.

Конечной целью расчета надежности технических устройств является оптимизация конструктивных решений и параметров, режимов эксплуатации, организация технического обслуживания и ремонтов. Поэтому уже на ранних стадиях проектирования важно оценить надежность объекта, выявить наиболее ненадежные

узлы и детали, определить наиболее эффективные меры повышения показателей надежности. Решение этих задач возможно после предварительного структурно-логического анализа системы.

Техническая система (ТС) – совокупность технических устройств (элементов), предназначенных для выполнения определенной функции или функций. Соответственно, элемент – составная часть системы. Расчленение ТС на элементы достаточно условно и зависит от постановки задачи расчета надежности.

Анализ структурной надежности ТС, как правило, включает следующие операции.

1. Анализируются устройства и выполняемые системой и ее составными частями функции, а также взаимосвязь составных частей.
2. Формируется содержание понятия «безотказная работа» для данной конкретной системы.
3. Определяются возможные отказы составных частей и системы, их причины и возможные последствия.
4. Оценивается влияние отказов составных частей системы на ее работоспособность.
5. Система разделяется на элементы, показатели надежности которых известны.
6. Составляется структурно-логическая схема надежности технической системы, которая является моделью ее безотказной работы.
7. Составляются расчётные зависимости для определения показателей надёжности ТС с использованием данных по надежности её элементов и с учётом структурной схемы.

Расчеты показателей безотказности ТС обычно проводятся в предположении, что как вся система, так и любой ее элемент могут находиться только в одном из двух возможных состояний – работоспособном и неработоспособном и отказы элементов независимы друг от друга. Состояние системы (работоспособное или неработоспособное) определяется состоянием элементов и их сочетанием. Поэтому теоретически возможно расчет безотказности любой ТС свести к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы.

1. Системы с последовательным соединением элементов

Системой с последовательным соединением элементов называется система, в которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы. Такое соединение элементов в технике встречается наиболее часто, поэтому его называют основным соединением.

В системе с последовательным соединением для безотказной работы в течение некоторой наработки t необходимо и достаточно, чтобы каждый из ее n элементов работал безотказно в течение этой наработки. Считая отказы элементов независимыми, вероятность одновременной безотказной работы n элементов определяют по теореме умножения вероятностей: вероятность совместного появления независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)). \quad (4.46) \quad (4.46)$$

Далее аргумент t в скобках, показывающий зависимость показателей надежности от времени, опускаем для сокращения записей формул.

Соответственно, вероятность отказа такой ТС

$$\sum M_B = -R_{Z\lambda} + F_{R_1} + F_{R_2} = 0. \quad (4.47)$$

Если система состоит из равнонадёжных элементов ($p_i = p$), то

$$P = p^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n. \quad (4.48)$$

Из формул (4.46)–(4.48) очевидно, что даже при высокой надежности элементов надежность системы при последовательном соединении оказывается тем более низкой, чем больше число элементов (например, при $p = 0,95$ и $n = 10$ имеем $P = 0,60$, при $n = 15$ $P = 0,46$, а при $n = 20$ $P = 0,36$). Кроме того, поскольку все сомножители в правой части выражения (4.46) не превышают единицы, вероятность безотказной работы ТС при последовательном соединении не может быть выше вероятности безотказной работы самого ненадежного из ее элементов (принцип «хуже худшего») и из малонадежных элементов нельзя создать высоконадежной ТС с последовательным соединением.

Если все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации и имеет место простейший поток отказов, наработки элементов и системы подчиняются экспоненциальному распределению (4.43) и на основании (4.46) можно записать

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\Lambda t), \quad (4.49)$$

где

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const} \quad (4.50)$$

есть интенсивность отказов системы. Таким образом, интенсивность отказов системы при последовательном соединении элементов и простейшем потоке отказов равна сумме интенсивностей отказов элементов. С помощью выражений (4.44) и (4.45) могут быть определены средняя и процентная наработка.

Из (4.49)–(4.50) следует, что для системы из n равнонадёжных элементов ($\lambda_i = \lambda$)

$$\Lambda = n\lambda, \quad T_{cp} = \frac{T_{cpi}}{n}, \quad (4.51)$$

т. е. интенсивность отказов в n раз больше, а средняя наработка в n раз меньше, чем у отдельного элемента.

2. Системы с параллельным соединением элементов

Системой с параллельным соединением элементов называется система, отказ которой происходит только в случае отказа всех ее элементов. Такие схемы надежности характерны для ТС, в которых элементы дублируются или резервируются, т. е. параллельное соединение используется как метод повышения надежности. Однако такие системы встречаются и самостоятельно (например, системы двигателей четырехмоторного самолета или параллельное включение диодов в мощных выпрямителях).

Для отказа системы с параллельным соединением элементов в течение наработки t необходимо и достаточно, чтобы все ее элементы отказали в течение этой наработки. Так что отказ системы заключается в совместном отказе всех элементов, вероятность чего (при допущении независимости отказов) может быть найдена по теореме умножения вероятностей как произведение вероятностей отказа элементов:

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_t = \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (4.52)$$

Соответственно, вероятность безотказной работы

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_t = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (4.53)$$

Для систем из равнонадежных элементов ($p_i = p$)

$$Q = q^n, \quad P = 1 - (1 - p)^n, \quad (4.54)$$

т. е. надежность системы с параллельным соединением повышается при увеличении числа элементов (например, при $p = 0,9$ и $n = 2$ $p = 0,99$, а при $n = 3$ $p = 0,999$).

Поскольку $q_i < 1$, произведение в правой части (4.52) всегда меньше любого из сомножителей, т. е. вероятность отказа системы не может быть выше вероятности самого надежного ее элемента

(«лучше лучшего») и даже из сравнительно ненадежных элементов возможно построение вполне надежной системы.

При экспоненциальном распределении наработки (4.43) выражение (4.54) принимает вид

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n, \quad (4.55)$$

откуда с помощью (1) после интегрирования и преобразований средняя наработка системы определяется

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}, \quad (4.56)$$

где $T_{0i} = 1/\lambda_i$ — средняя наработка элемента.

Средняя наработка системы с параллельным соединением больше средней наработки ее элементов (например, при $G_p = 15$ $T_0 = 1,5T_{0i}$, при $n=3$ $T_0 = 1,83T_{0i}$).

3. Системы типа « m из n »

Систему типа « m из n » можно рассматривать как вариант системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из n элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее m элементов ($m < n$).

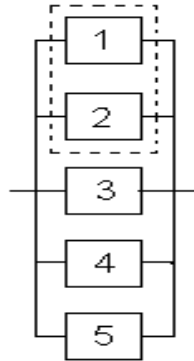


Рис. 4.10. Система «2 из 5»

На рис. 4.10 представлена система «2 из 5», которая работоспособна, если из пяти её элементов работают любые два, три, четыре или все пять (на схеме пунктиром обведены функционально необходимые два элемента, причем выделение элементов 1 и 2 произведено условно, в действительности все пять элементов равнозначны). Системы типа « m из n » наиболее часто встречаются в электрических и связных системах (при этом элементами выступают связующие каналы), технологических линий, а также при структурном резервировании.

Для расчета надежности систем типа « m из n » при сравнительно небольшом количестве элементов можно воспользоваться методом прямого перебора. Он заключается в определении работоспособности каждого из возможных состояний системы, которые определяются различными сочетаниями работоспособных и неработоспособных состояний элементов.

Все состояния системы «2 из 5» занесены в табл. 4.18 (в таблице работоспособные состояния элементов и системы отмечены знаком «+», неработоспособные — знаком «-»). Для данной системы работоспособность определяется лишь количеством работоспособных элементов. По теореме умножения вероятностей вероятность любого состояния определяется как произведение вероятностей состояний, в которых пребывают элементы. Например, в строке 9 описано состояние системы, в которой отказали элементы 2 и 5, а остальные работоспособны. При этом условие «2 из 5» выполняется, так что система в целом работоспособна. Вероятность такого состояния

$$P_9 = p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 = p^3 q^2. \quad (4.57)$$

(Предполагается, что все элементы равнонадежны.) С учетом всех возможных состояний вероятность безотказной работы системы может быть найдена по теореме сложения вероятностей всех работоспособных сочетаний. Поскольку количество неработоспособных состояний меньше, чем работоспособных (соответственно 6 и 26), проще вычислить вероятность отказа системы. Для этого суммируются вероятности неработоспособных состояний (где не выполняется условие «2 из 5»)

$$\begin{aligned} Q &= P_{32} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} = q^5 + 5pq^4 = \\ &= (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5. \end{aligned} \quad (4.58)$$

Тогда вероятность безотказной работы системы

$$P = 1 - q = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \quad (4.59)$$

Расчет надежности системы « m из n » может производиться комбинаторным методом, в основе которого лежит формула биномиального распределения. Биномиальному распределению подчиняется дискретная случайная величина k — число появлений некоторого события в серии из n опытов, если в отдельном опыте вероятность появления события составляет p . При этом вероятность появления события ровно k раз определяется

$$P_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (4.60)$$

где C_n^k – биномиальный коэффициент, называемый числом сочетаний по « k из n » (т. е. сколькими разными способами можно реализовать ситуацию « k из n »):

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (4.61)$$

Таблица 4.18

Таблица состояний системы «2 из 5»

№ состояния	Состояние элементов					Состояние системы	Вероятность состояния системы
	1	2	3	4	5		
1	+	+	+	+	+	+	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p^4 q^1 = p^4(1-p)$
3	+	+	+	-	+	+	
4	+	+	-	+	+	+	
5	+	-	+	+	+	+	
6	-	+	+	+	+	+	
7	+	+	+	-	-	+	$p^3 q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	
9	+	-	+	+	-	+	
10	-	+	+	+	-	+	
11	+	+	-	-	+	+	
12	+	-	+	-	+	+	
13	-	+	+	-	+	+	
14	+	-	-	+	+	+	
15	-	+	-	+	+	+	
16	-	-	+	+	+	+	
17	+	+	-	-	-	+	$p^2 q^3 = p^2(1-p)^3$
18	+	-	+	-	-	+	
19	-	+	+	-	-	+	
20	+	-	-	-	+	+	
21	-	+	-	-	+	+	
22	-	-	-	+	+	+	
23	+	-	-	+	-	+	
24	-	+	-	+	-	+	
25	-	-	+	-	+	+	
26	-	-	+	+	-	+	
27	+	-	-	-	-	-	$p^1 q^4 = p^1(1-p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	
29	-	-	+	-	-	-	
30	-	-	-	+	-	-	
31	-	-	-	-	+	-	
32	-	-	-	-	-	-	$q^5 = (1-p)^5$

Значения биномиальных коэффициентов приведены в табл. 4.24.

Поскольку для отказа системы « m из n » достаточно, чтобы количество исправных элементов было меньше m , вероятность отказа может быть найдена по теореме сложения вероятностей для $k = 0, 1, \dots (m - 1)$:

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} P_k = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (4.62)$$

Аналогичным образом можно найти вероятность безотказной работы как сумму (4.60) для $k = m, m + 1, \dots, n$:

$$P = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (4.63)$$

Очевидно, что $Q + P = 1$, поэтому в расчетах следует выбирать ту из формул (4.62), (4.63), которая в данном конкретном случае содержит меньшее число слагаемых.

Для системы «2 из 5» (рис. 4.10) по формуле (4.63) получим:

$$P = C_5^2 p^2 (1-p)^3 + C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = 10p^2(1-p)^3 + \quad (4.64)$$

$$+ 10p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p) + p^5 = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5.$$

Вероятность отказа той же системы по (4.62):

$$Q = C_5^0 (1-p)^5 + C_5^1 p(1-p)^4 = (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = \quad (4.65)$$

$$= 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5,$$

что, как видно, дает тот же результат для вероятности безотказной работы.

В табл. 4.19 приведены формулы для расчета вероятности безотказной работы систем типа « m из n » при $m \leq n \leq 5$. Очевидно, при $m = 1$ система превращается в обычную систему с параллельным соединением элементов, а при $m = n$ — с последовательным соединением.

Формулы для расчета вероятности безотказной работы

Общее число элементов, n					
m	1	2	3	4	5
1	p	$2p - p^2$	$3p - 3p^2 + p^3$	$4p - 6p^2 + 4p^3 - p^4$	$5p - 10p^2 + 10p^3 - 5p^4 + p^5$
2	-	p^2	$3p^2 - 2p^3$	$6p^2 - 8p^3 + 3p^4$	$10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5$
3	-	-	p^3	$4p^3 - 3p^4$	$10p^3 - 15p^4 + 6p^5$
4	-	-	-	p^4	$5p^4 - 4p^5$
5	-	-	-	-	p^5

4. Мостиковые схемы

Мостиковая структура (рис. 4.11,а, б) не сводится к параллельному или последовательному типу соединения элементов, а представляет собой параллельное соединение последовательных цепочек элементов с диагональными элементами, включенными между узлами различных параллельных ветвей (элемент 3 на рис. 4.11,а; элементы 3 и 6 на рис. 4.11,б). Работоспособность такой системы определяется не только количеством отказавших элементов, но и их положением в структурной схеме. Например, работоспособность ТС, схема которой приведена на рис. 4.11,а, будет утрачена при одновременном отказе элементов 1 и 2, или 4 и 5, или 2, 3 и 4 и т. д. В то же время отказ элементов 1 и 5, или 2 и 4, или 1, 3 и 4, или 2, 3 и 5 к отказу системы не приводит.

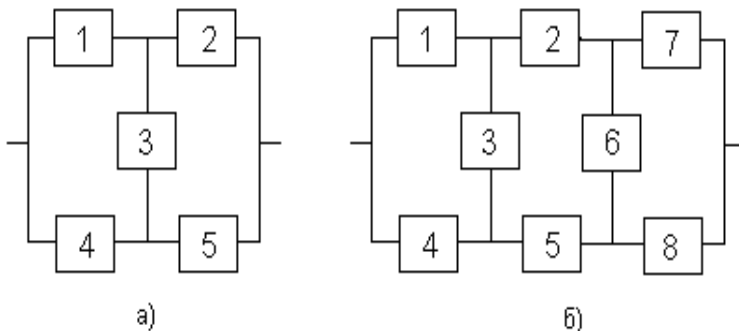


Рис. 4.11. Мостиковые схемы

Для расчета надежности мостиковых схем можно воспользоваться методом прямого перебора, но при анализе работоспособности каждого состояния системы необходимо учитывать не только число отказавших элементов, но и их положение в схеме (табл. 4.20).

Таблица состояний мостиковой системы

№ состояния	Состояние элементов					Состояние системы	Вероятность состояния	
	1	2	3	4	5		в общем случае	при равнонадежных элементах
1	+	+	+	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	$p^4 q = p^4 (1 - p)$
3	+	+	+	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
4	+	+	-	+	+	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
5	+	-	+	+	+	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
6	-	+	+	+	+	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
7	+	+	+	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	$p^3 q^2 = p^3 (1 - p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
9	+	-	+	+	-	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
10	-	+	+	+	-	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	
11	+	+	-	-	+	+	$p_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
12	+	-	+	-	+	+	$p_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
13	-	+	+	-	+	+	$q_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
14	+	-	-	+	+	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
15	-	+	-	+	+	+	$q_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
16	-	-	+	+	+	-	$q_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
17	+	+	-	-	-	-	$p_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	$p^2 q^3 = p^2 (1 - p)^3$
18	+	-	+	-	-	-	$p_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
19	-	+	+	-	-	-	$q_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	
20	+	-	-	-	+	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
21	-	+	-	-	+	+	$q_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
22	-	-	-	+	+	-	$q_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
23	+	-	-	+	-	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
24	-	+	-	+	-	-	$q_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
25	-	-	+	-	+	-	$q_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
26	-	-	+	+	-	-	$q_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
27	+	-	-	-	-	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$p q^4 = p (1 - p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	$q_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	
29	-	-	+	-	-	-	$q_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
30	-	-	-	+	-	-	$q_1 q_2 q_3 p_4 q_5$	
31	-	-	-	-	+	-	$q_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
32	-	-	-	-	-	-	$q_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$q^5 = (1 - p)^5$

Вероятность безотказной работы системы определяется как сумма вероятностей всех работоспособных состояний:

$$\begin{aligned}
 P = & p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 p_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 + \\
 & + q_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 q_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5.
 \end{aligned} \tag{4.66}$$

В случае равнонадёжных элементов

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2. \tag{4.67}$$

Метод прямого перебора эффективен только при малом количестве элементов n , поскольку число состояний системы составляет 2^n . Например, для схемы на рис. 4.11,б их количество составит уже 256. Некоторое упрощение достигается, если в таблицу состояний включать только сочетания, отвечающие работоспособному (или только неработоспособному) состоянию системы в целом.

Для анализа надёжности ТС, структурные схемы которых не сводятся к параллельному или последовательному типу, можно воспользоваться также методом логических схем с применением алгебры логики (булевой алгебры). Применение этого метода сводится к составлению для ТС формулы алгебры логики, которая определяет условие работоспособности системы. При этом для каждого элемента и системы в целом рассматриваются два противоположных события — отказ и сохранение работоспособности.

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

Рассмотрим метод минимальных путей для расчета вероятности безотказной работы на примере мостиковой схемы (рис. 4.11,а).

Минимальным путем называется последовательный набор работоспособных элементов системы, который обеспечивает ее работоспособность, а отказ любого из них приводит к ее отказу.

Минимальных путей в системе может быть один или несколько. Очевидно, система с последовательным соединением элементов (рис. 4.10) имеет только один минимальный путь, включающий все элементы. В системе с параллельным соединением (рис. 4.11) число минимальных путей совпадает с числом элементов, и каждый путь включает один из них.

Для мостиковой системы из пяти элементов (рис. 4.11,а) минимальных путей четыре: (элементы 1 и 4), (2 и 5), (1, 3 и 5), (2, 3 и 5). Логическая схема такой системы (рис. 4.12) составляется

таким образом, чтобы все элементы каждого минимального пути были соединены друг с другом последовательно, а все минимальные пути параллельно.

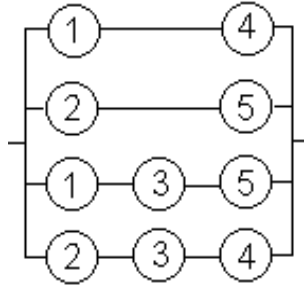


Рис. 4.12. Логическая схема мостиковой системы по методу минимальных путей

Затем для логической схемы составляется функция алгебры логики A по общим правилам расчета вероятности безотказной работы, но вместо символов вероятностей безотказной работы элементов p_i и системы P используются символы события (сохранения работоспособности элемента a_i и системы A). Так, отказ логической схемы рис. 4.12 состоит в одновременном отказе всех четырех параллельных ветвей, а безотказная работа каждой ветви — в одновременной безотказной работе ее элементов. Последовательное соединение элементов логической схемы соответствует логическому умножению («И»), параллельное — логическому сложению («ИЛИ»). Следовательно, схема рис. 4.12 соответствует утверждению: система работоспособна, если работоспособны элементы 1 и 4, или 2 и 5, или 1,3 и 5, или 2,3 и 4. Функция алгебры логики запишется:

$$A = 1 - (1 - a_1 a_4)(1 - a_2 a_5)(1 - a_1 a_3 a_5)(1 - a_2 a_3 a_4). \quad (4.68)$$

В выражении (4.68) переменные a рассматриваются как булевы, т. е. могут приниматься только два значения: 0 или 1. Тогда при возведении в любую степень любая переменная a сохраняет свое значение: $a_i^k = a_i$. На основе этого свойства функция алгебры логики (4.68) может быть преобразована к виду

$$\begin{aligned} A = & a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_4 - \\ & - a_1 a_2 a_3 a_5 - 2a_1 a_2 a_4 a_5 - a_2 a_3 a_4 a_5 + 2a_1 a_2 a_3 a_4 a_5. \end{aligned} \quad (4.69)$$

Заменив в выражении (4.69) символы событий a_i их вероятностями p_i , получим уравнение для определения вероятности безотказной работы системы

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 -$$

$$- p_1 p_2 p_3 p_5 - 2 p_1 p_2 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5. \quad (4.70)$$

Для системы равнонадёжных элементов ($p_i = p$) выражение (4.70) легко преобразуется в формулу (4.67).

Метод минимальных путей дает точное значение только для сравнительно простых систем с небольшим числом элементов. Для более сложных систем результат расчета является нижней границей вероятности безотказной работы.

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

Минимальным сечением называется набор неработоспособных элементов, отказ которых приводит к отказу системы, а восстановление работоспособности любого из них — к восстановлению работоспособности системы. Как и минимальных путей, минимальных сечений может быть несколько. Очевидно, система с параллельным соединением элементов имеет только одно минимальное сечение, включающее все ее элементы (восстановление любого восстановит работоспособность системы). В системе с последовательным соединением элементов число минимальных путей совпадает с числом элементов, и каждое сечение включает один из них.

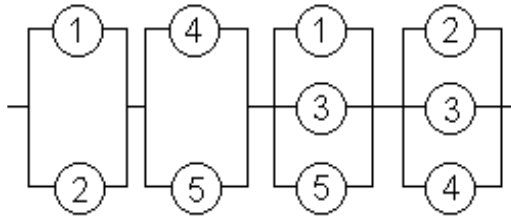


Рис. 4.13. Логическая схема мостиковой системы по методу минимальных сечений

В мостиковой системе (рис. 4.11,а) минимальных сечений четыре (элементы 1 и 2), (4 и 5), (1, 3 и 5), (2, 3 и 4). Логическая схема системы (рис. 4.13) составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального сечения были соединены друг с другом параллельно, а все минимальные сечения — последовательно. Аналогично методу минимальных путей, составляется функция алгебры логики. Безотказная работа логической системы рис. 4.13 заключается в безотказной работе всех последовательных участков, а отказ каждого из них — в одновременном отказе всех параллельно включенных элементов. Как видно, поскольку схема метода минимальных сечений формулирует условия отказа системы, в ней

последовательное соединение соответствует логическому «ИЛИ», а параллельное – логическому «И». Схема рис. 4.13 соответствует формулировке: система откажет, если откажут элементы 1 и 2, или 4 и 5, или 1, 3 и 5, или 2, 3 и 4. Функция алгебры логики запишется

$$A = [1 - (1 - a_1)(1 - a_2)] \cdot [1 - (1 - a_4)(1 - a_5)] \cdot [1 - (1 - a_1)(1 - a_3)(1 - a_5)] \cdot [1 - (1 - a_2)(1 - a_3)(1 - a_4)] \quad (4.71)$$

После преобразований с использованием свойств булевых переменных (4.71) приобретает форму (4.69), после замены событий их вероятностями переходит в выражение (4.70).

Таким образом, для мостиковой системы из пяти элементов верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы, полученные методами минимальных сечений и минимальных путей, совпали с точными значениями (4.67), полученными методом прямого перебора. Для сложных систем это может не произойти, поэтому методы минимальных путей и минимальных сечений следует применять совместно.

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

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0), \quad (4.72)$$

где p_i и $q_i = 1 - p_i$ – вероятности безотказной работы и отказа i -го элемента, $P(p_i = 1)$ и $P(p_i = 0)$ – вероятности работоспособного состояния системы при условии, что i -й элемент абсолютно надежен и что i -й элемент отказал.

Для мостиковой схемы (рис. 4.11,а) в качестве особого элемента целесообразно выбрать диагональный элемент 3. При $p_3 = 1$ мостиковая схема превращается в параллельно-последовательное соединение (рис. 4.14,а), а при $p_3 = 0$ – в последовательно-параллельное (рис. 4.14,б).

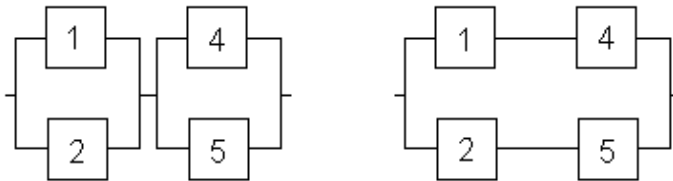


Рис. 4.14. Преобразование мостиковой схемы при абсолютно надежном (а) и отказавшем (б) центральном элементе

Для преобразованных схем можно записать:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_3)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)]; \quad (4.73)$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5). \quad (4.74)$$

Тогда на основании формулы (4.72) получим:

$$P = p_3 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + \\ + (1 - p_3) [1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)] \quad (4.75)$$

Легко убедиться, что для равнонадёжных элементов формула (4.75) обращается в (4.67).

Этим методом можно воспользоваться и при разложении относительно нескольких «особых» элементов. Например, для двух элементов (i, j) выражение (4.72) примет вид:

$$P = p_i p_j P(p_i = 1, p_j = 1) + p_i q_j P(p_i = 1, p_j = 0) + \\ + q_i p_j P(p_i = 0, p_j = 1) + q_i q_j P(p_i = 0, p_j = 0). \quad (4.76)$$

Вероятность безотказной работы мостиковой схемы (рис. 4.11, б) при разложении относительно диагональных элементов 3 и 6 по (4.76) определится:

$$P = p_3 p_6 P(p_3 = 1, p_6 = 1) + p_3 q_6 P(p_3 = 1, p_6 = 0) + \\ + q_3 p_6 P(p_3 = 0, p_6 = 1) + q_3 q_6 P(p_3 = 0, p_6 = 0). \quad (4.77)$$

Вероятности $P(p_3 p_6)$ легко ставить, выполнив предварительно преобразованные схемы, подобно рис. 4.14, а, б.

5. Комбинированные системы

Большинство реальных ТС имеют сложную комбинированную структуру, часть элементов которой образует последовательное соединение, другая часть — параллельное, отдельные ветви структуры образуют мостиковые схемы или схемы типа « m из n ».

Метод прямого перебора для таких систем оказывается практически не реализуем. Более целесообразно в этих случаях предварительно произвести декомпозицию системы, разбив ее на простые подсистемы — группы элементов, методика расчета надежности которых известна. Затем эти подсистемы в структурной схеме надежности заменяются квазиэлементами с вероятностями безотказной работы, равными вычисленным вероятностям безотказной работы этих подсистем. При необходимости такую процедуру можно выполнить несколько раз, до тех пор, пока оставшиеся квазиэлементы не образуют структуру, методика расчета надежности которой также известна.

В качестве примера рассмотрим комбинированную систему, представленную на рис. 4.15. Здесь элементы 2 и 5, 4 и 7, 9 и 12, 11 и 14 попарно образуют друг с другом последовательные соединения. Заменим их соответственно квазиэлементами *A*, *B*, *C*, *D*. Элементы 15, 16, 17 и 18 образуют параллельное соединение, а элементы 3, 6, 8, 10 и 13 – систему «3 из 5». Соответствующие квазиэлементы обозначим *E* и *F*. В результате преобразованная схема примет вид, показанный на рис. 4.16, *a*. В ней, в свою очередь, элементы *A*, *B*, *C*, *D*, *F* образуют мостиковую схему, которую заменяем квазиэлементом *G*. Схема, полученная после таких преобразований (рис. 4.16, *б*), образует последовательное соединение элементов 1, *G*, *E*, 19, для которых справедливы соотношения. Отметим, что метод прямого перебора для исходной системы потребовал бы рассмотреть $2^{19} = 524288$ возможных состояний.

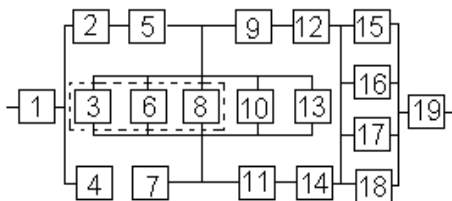


Рис. 4.15. Исходная система

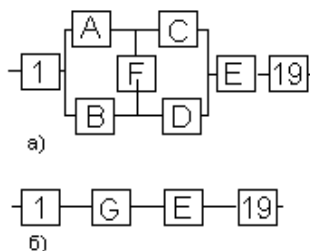


Рис. 4.16. Преобразованные системы

6. Методы повышения надежности

Расчетные зависимости для определения основных характеристик надежности ТС показывают, что надежность системы зависит от ее структуры (структурно-логической схемы) и надежности элементов. Поэтому для сложных систем возможны два пути повышения надежности: повышение надежности элементов и изменение структурной схемы.

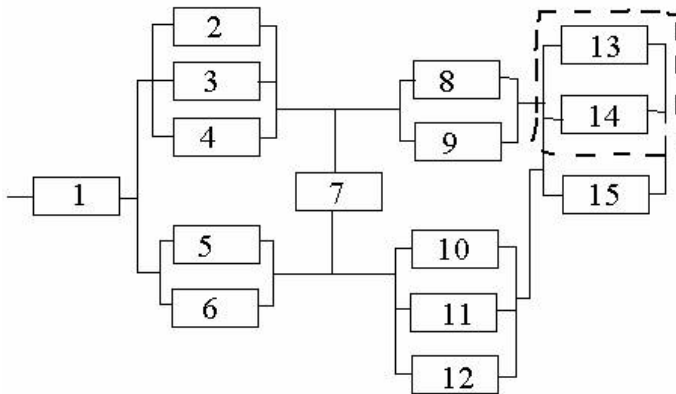
Повышение надежности элементов на первый взгляд представляется наиболее простым приемом повышения надежности системы. Действительно, теоретически всегда можно указать такие характеристики надежности элементов, чтобы вероятность безотказной работы системы удовлетворяла заданным требованиям. Изменение структуры системы с целью повышения надежности подразумевает два аспекта.

Содной стороны, это означает перестройку конструктивной или функциональной схемы ТС (структуры связей между составными

элементами), изменение принципов функционирования отдельных частей системы (например, переход от аналоговой обработки сигналов к цифровой). Такого рода преобразования ТС возможны исключительно редко, так что этот прием, в общем, не решает проблемы надежности.

С другой стороны, изменение структуры понимается как введение в ТС дополнительных, избыточных элементов, включающихся в работу при отказе основных. Применение дополнительных средств и возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов называется резервированием.

Пример выполнения практического задания



$$\lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_{12} = 1,0$$

$$\lambda_1 = \lambda_{13} = \lambda_{14} = \lambda_{15} = 0,1$$

$$\lambda_7 = 0,5$$

1. Преобразование схемы

1. В исходной схеме элементы 2, 3, 4 образуют параллельное соединение. Заменяем их квазиэлементом А, учитывая, что $P_2 = P_3 = P_4$.

$$P_A = 1 - Q_2 \cdot Q_3 \cdot Q_4 = 1 - (1 - P_2) \cdot 3.$$

2. Элементы 5 и 6 образуют параллельное соединение. Заменяем их квазиэлементом В и учитывая, что $P_5 = P_6 = P_2$, получим:

$$P_B = 1 - Q_5 \cdot Q_6 = 1 - (1 - P_2) \cdot 2.$$

3. Элементы 8, 9 образуют параллельное соединение. Заменяв их квазиэлементом C и учитывая, что $P_8 = P_9 = P_2$, получим:

$$P_C = 1 - (1 - P_2) \cdot 2 = P_B.$$

4. Элементы 10, 11 и 12 образуют также параллельное соединение. $P_{10} = P_{11} = P_{12}$. Заменяем их квазиэлементом D .

$$P_D = P_A = 1 - (1 - P_2) \cdot 3.$$

5. Элементы 13, 14 и 15 образуют соединение «2 из 3». Так как $P_{13} = P_{14} = P_{15}$, то для определения вероятности безотказной работы элемента M воспользуемся комбинаторным методом.

Преобразованная схема изображена на рис. 4.17.

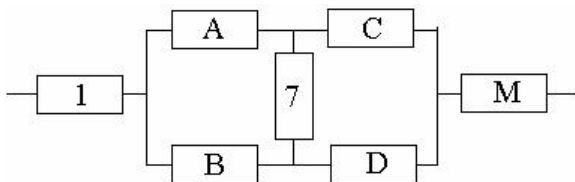


Рис. 4.17. Преобразованная схема

6. Элементы $A, B, 7, C, D$ образуют (рис. 4.17) мостиковую систему, которую можно заменить квазиэлементом N . Для расчёта вероятности безотказной работы воспользуемся методом кратчайших путей.

По рис. 4.17 кратчайшие пути:

- 1) $A, 7, D$;
- 2) A, C ;
- 3) B, D ;
- 4) $B, 7, C$.

Составим дизъюнктивную нормальную форму:

$$\begin{aligned} \varphi &= P_A P_7 P_D \vee P_A P_C \vee P_B P_D \vee P_B P_7 P_C = \\ &= P_7 (P_A P_D \vee P_A P_C \vee P_B P_D \vee P_B P_C) + P_7 (P_A P_C \vee P_B P_D) \Rightarrow \\ \varphi_1 &= P_A P_D \vee P_A P_C \vee P_B P_D \vee P_B P_C = P_A (P_D \vee P_C) \vee P_B (P_D \vee P_C) = \\ &= (P_A \vee P_B) \cdot (P_D \vee P_C); \\ \varphi_2 &= P_A P_C \vee P_B P_D; \end{aligned}$$

$$R(\varphi) = p_N = p_7(p_A + p_B - p_A p_B)(p_D + p_C - p_D p_C) + (1 - p_7)(p_A p_C + p_B p_D - p_A p_C p_B p_D) = p_7(p_A + p_B - p_A p_B)^2 + (1 - p_7)(2p_A p_B - (p_A p_B)^2).$$

$P_7 R(\varphi_1)$ – вероятность безотказной работы при абсолютно надёжном элементе 7 (рис. 4.18,а).

$P_7 R(\varphi_2)$ – вероятность безотказной работы при абсолютно ненадёжном элементе 7 (рис. 4.18,б).

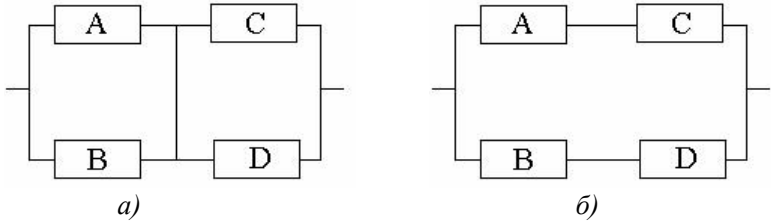


Рис. 4.18

Преобразование моста при абсолютно надёжном (рис. 4.18,а) и отказавшем элементе (рис. 4.18,б).

2. Расчёт вероятности безотказной работы элементов

Расчёт вероятности безотказной работы элементов 1–15, квазиэлементов A, B, C, D, M, N и самой системы.

В преобразованной схеме (рис. 4.18) элементы 1, M, N образуют последовательное соединение. Тогда вероятность безотказной работы всей системы:

$$P_S = P_1 P_N P_M.$$

Так как по условию все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации, то вероятность безотказной работы элементов 1–15 подчиняются экспоненциальному закону:

$$p_i = \exp(-\lambda_i \cdot t).$$

Результаты расчётов вероятностей безотказной работы элементов 1–15 исходной схемы по формуле, квазиэлементов A, B, C, D, M, N и самой системы по формуле приведены в табл. 4.21.

Результаты расчётов вероятностей безотказной работы

Элемент	Наработка $t, \times 10^6$ ч											
	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$ ч	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
1, 1,3–15	0,1	0,99	0,9802	0,9704	0,9607	0,9512	0,9417	0,9324	0,9231	0,9139	0,9048	0,8958
2–12	1,0	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066	0,3679	0,3329
7	0,5	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408	0,7047	0,6703	0,6376	0,6065	0,5769
A, D	–	0,9991	0,994	0,9826	0,9642	0,9391	0,9081	0,8724	0,8330	0,7910	0,7474	0,7031
B, C	–	0,9909	0,9671	0,9328	0,8913	0,8452	0,7964	0,7466	0,6967	0,6479	0,6004	0,555
N	–	0,9999	0,9995	0,997	0,99	0,9219	0,9527	0,9193	0,8758	0,8235	0,7642	0,7003
M	–	0,9997	0,9988	0,9974	0,9955	0,9931	0,9902	0,9869	0,9832	0,979	0,9745	0,9697
S	–	0,9897	0,9786	0,965	0,9468	0,9219	0,8884	0,8459	0,7948	0,7368	0,6739	0,6083

Продолжение табл. 4.21

Элемент	Наработка $t, \times 10^6$ ч										
	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$ ч	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	0,555	0,8325		
1, 1,3–15	0,1	0,8869	0,8780	0,8693	0,8521	0,8353	0,8187	0,9461	0,9201		
2–12	1,0	0,3012	0,2736	0,2466	0,2019	0,1653	0,1353	0,5744	0,4350		
7	0,5	0,5488	0,5222	0,4966	0,4493	0,4066	0,3679	0,7579	0,6595		
A, D	–	0,6588	0,6158	0,5724	0,4916	0,4184	0,3535	0,9229	0,8196		
B, C	–	0,5117	0,4715	0,4324	0,363	0,3033	0,2524	0,8188	0,6807		
N	–	0,6341	0,5688	0,5031	0,3845	0,2849	0,206	0,9645	0,8597		
M	–	0,9645	0,9579	0,9532	0,9409	0,9275	0,9133	0,9916	0,9819		
S	–	0,5424	0,4789	0,4169	0,3083	0,2207	0,154	0,9048	0,7767		

На рис. 4.19 представлен график зависимости вероятности безотказной работы от времени наработки.

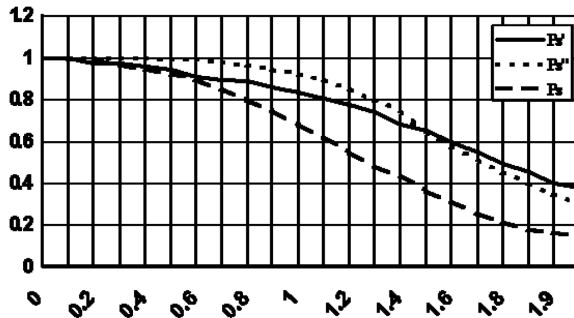


Рис. 4.19. График зависимости вероятности безотказной работы системы

График зависимости вероятности безотказной работы системы от времени наработки, системы после увеличения надёжности элементов PS' и после увеличения надёжности элементов PS' и после структурного резервирования PS'' .



Рис. 4.20. Преобразованная схема

3. Расчёт увеличения надёжности элементов

По графику (рис. 4.11) находим для $p_\gamma = 0,9 (\gamma = 90\%)$ γ -процентную наработку системы $T_\gamma = 0,555 \cdot 10^6$ ч. Проверочный расчёт показывает, что при $t = 0,555 \cdot 10^6$ ч $p_\gamma = 0,9048 \approx 0,9$.

По условиям задания повышенная γ -процентная наработка системы:

$$T_\gamma^I = 1,5 \cdot T_\gamma = 1,5 \cdot 0,555 \cdot 10^6 = 0,8325 \cdot 10^6 \text{ ч.}$$

Расчёт показывает, что при $t = 0,8325 \cdot 10^6$ ч для элементов преобразованной схемы:

$$p_1 = 0,9201, \quad p_M = 0,9819, \quad p_N = 0,8597.$$

Следовательно, из трех последовательно соединённых элементов минимальное значение вероятности имеет элемент N (мост).

Для того чтобы при $T_\gamma^I = 0,8325 \cdot 10^6$ ч. система в целом имела вероятность безотказной работы $p_\gamma = 0,9$, необходимо, чтобы элемент N имел вероятность безотказной работы:

$$p_N = \frac{p_\gamma}{p_1 p_M} = \frac{0,9}{0,9201 \cdot 0,9819} = 0,9962.$$

Но при этом значении элемент N будет самым надёжным. Значит

$$pp = \frac{p}{p} = \frac{0,9}{0,9819} = 0,9166 < 0,9819.$$

Следовательно, надо увеличивать надёжность двух элементов: 1 и N .

$$p_1 p_N = 0,9166;$$

$$p_1 = p_N = \sqrt{0,9166} = 0,9574;$$

$$p_1 = 0,9574 \text{ (оставляем).}$$

Увеличим надёжность моста. Для этого вычислим значимость элементов A , B , C и D в нём.

$$\begin{aligned} E_1 = E_{A,D} &= (p_7(1 + p_B - p_B)(1 + p_C - p_C) + (1 - p_7)(p_C + p_B - p_A p_C)) - \\ &- (p_7(p_B - p)(p_C) + (1 - p_7) \cdot 0) = [0,6595 + (1 - 0,6595)(2 \cdot 0,6807 - 0,6807^2)] - \\ &- (0,6595 \cdot 0,6807^2) = 0,6595 + 0,3405 \cdot (0,898) - 0,4489 = 0,516; \\ E_2 = E_{B,C} &= [p_7(p_A + 1 - p_A)(p_D + 1 - p_D) + (1 - p_7)(p_A + p_D - p_A p_D)] - \\ &- [(p_7 p_A p_D) + (1 - p_7) \cdot 0] = [0,6595 \cdot 1 + (1 - 0,6595)(0,8196 \cdot 2 - 0,8196^2)] - \\ &- (0,6595 \cdot 0,8196^2) = 0,546. \end{aligned}$$

Таким образом, важность (значимость) элементов B и C больше, значит, их будем увеличивать.

Для нахождения минимально необходимой вероятности безотходной работы элемента 2 необходимо решить уравнение относительно P_2 при $P_N = 0,9574$. Найдём его графически. График представлен на рис. 4.21 (по данным табл. 4.21).

По графику находим: при $P_N = 0,9574$ $P_2 = 0,6875$.

Так как по условиям задания все элементы работают в условиях нормальной эксплуатации и подчиняются экспоненциальному закону, то для элемента P_2 при $t = 0,8325 \cdot 10^6$ ч находим:

$$\lambda'_2 = \lambda'_5 = \lambda'_6 = \lambda'_7 = \lambda'_8 = \frac{\ln p_2}{t} = -\frac{\ln 0,6875}{0,8375 \cdot 10^6} = 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Таким образом, для увеличения γ -процентной наработки необходимо увеличить надёжность элементов 5, 6, 7 и 8 и снизить интенсивность их отказов с $1 \cdot 10^{-6}$ до $0,45 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, то есть в 2,2 раза.

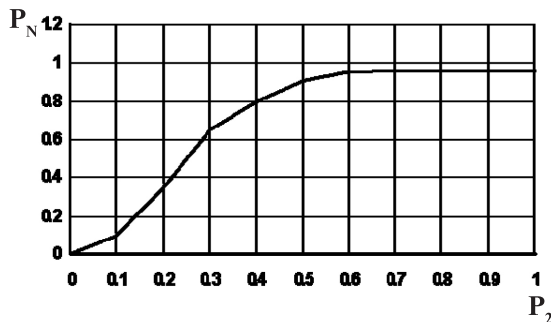


Рис. 4.21. График зависимости вероятности безотказной работы моста N от вероятности безотказной работы его элементов

Результаты расчётов для системы с увеличенной надёжностью элементов B' , C' и 1 приведены в табл. 4.22, элемента N (моста) и системы S' после повышения надёжности.

Таблица 4.22

Результаты расчётов для системы с увеличенной надёжностью

Элемент	Наработка $t, \cdot 10^6 \text{ ч}$										
	$\lambda_i \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	0,2	0,4	0,6	0,8	0,555	0,8325	1	1,2	1,4	1,8
$2'$	0,45	0,9139	0,8353	0,7634	0,6977	0,9297	0,6875	0,6376	0,5827	5326	0,4449
A	—	0,994	0,9642	0,9082	0,8330	0,9512	0,8196	0,7474	0,6588	5724	0,4184
B' , C'	—	0,9926	0,9729	0,9440	0,9086	0,9521	0,9024	0,8687	0,8259	7815	0,6918
N'	—	0,9999	0,9977	0,9871	0,9602	0,9907	0,9539	0,9120	0,8429	7578	0,5677
S'	—	0,9922	0,9502	0,9401	0,9144	0,9434	0,908	0,8686	0,8028	7217	0,5407

График зависимости вероятности безотказной системы после увеличения надёжности элементов приведён на рис. 4.19 (кривая S').

1. На рис. 4.19 представлена зависимость вероятности безотказной работы системы (кривая P). Из графика видно, что 90%-ная наработка исходной системы составляет $0,555 \cdot 10^6 \text{ ч}$.

2. Для повышения надёжности и увеличения 50%-ной наработки системы в 1,5 раза (до $0,8325 \cdot 10^6 \text{ ч}$) предложен способ повышения надёжности элементов 2, 3, 4, 5 и 6 и уменьшения их отказов с 1 до $0,45 \cdot 10^{-6} \text{ ч}$.

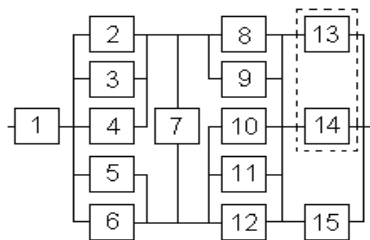
Задание

По структурной схеме надежности технической системы в соответствии с вариантом задания гамма-процентному ресурсу γ и значениям интенсивностей отказов ее элементов λ_i (табл. 4.23) требуется:

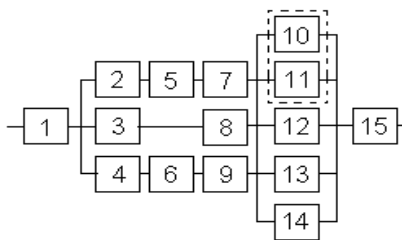
- 1) построить график изменения вероятности безотказной работы системы от времени наработки в диапазоне снижения вероятности до уровня $0,1-0,2$;
- 2) определить γ -процентную наработку технической системы;
- 3) обеспечить увеличение γ -процентной наработки не менее чем в 1,5 раза за счет повышения надежности элементов.

Все элементы системы работают в режиме нормальной эксплуатации (простейший поток отказов). Резервирование отдельных элементов или групп элементов осуществляется идентичными по надежности резервными элементами или группами элементов. Переключатели при резервировании считаются идеальными.

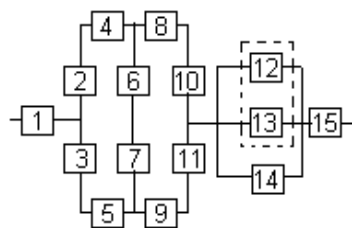
На схемах обведенные пунктиром m элементы являются функционально необходимыми из n параллельных ветвей.



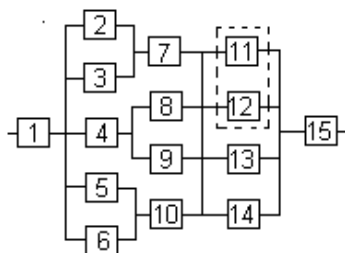
Вариант 1



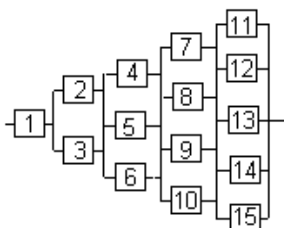
Вариант 2



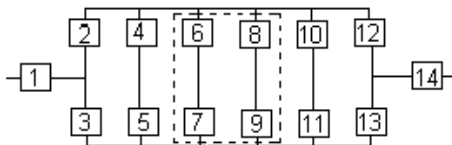
Вариант 3



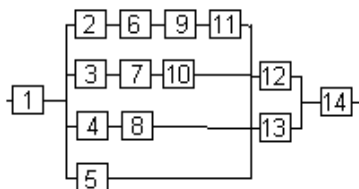
Вариант 4



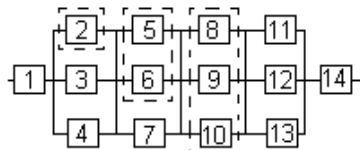
Вариант 5



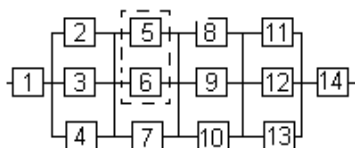
Вариант 6



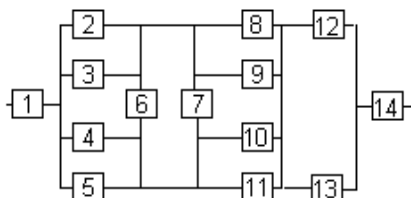
Вариант 7



Вариант 8



Вариант 9



Вариант 10

Таблица 4.23

Численные значения параметров к заданию

№ варианта	Интенсивности отказов элементов, λ_i , $\times 10^{-6}$ 1/ч										
	γ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	90	0,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0
2	95	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0
3	80	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0
4	70	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0
5	50	0,01	0,05	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	1,0	0,1	0,1
6	75	0,01	0,05	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7	65	0,05	0,5	0,5	0,05	0,05	0,005	0,005	0,1	0,1	0,1
8	85	0,1	0,5	0,5	0,2	0,2	0,01	0,01	0,5	0,5	0,5
9	60	0,03	0,5	0,5	0,2	0,2	1,0	1,0	1,0	0,003	0,003
10	50	0,1	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0

Таблица 4.24

$$\text{Биномиальные коэффициенты } C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

n	m										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1										
1	1	1									
2	1	2	1								
3	1	3	3	1							
4	1	4	6	4	1						
5	1	5	10	10	5	1					
6	1	6	15	20	15	6	1				
7	1	7	21	35	35	21	7	1			
8	1	8	28	56	70	56	28	8	1		
9	1	9	36	84	126	126	84	36	9	1	
10	1	10	45	120	210	252	210	120	45	10	1
11	1	11	55	165	330	462	462	330	165	55	11
12	1	12	66	220	495	792	924	792	495	220	66
13	1	13	78	286	715	1287	1716	1716	1287	715	286
14	1	14	91	364	1001	2002	3003	3432	3003	2002	1001
15	1	15	105	455	1365	3003	5005	6435	6435	5005	3003
16	1	16	120	560	1820	4368	8008	11440	12870	11440	8008
17	1	17	136	680	2380	6188	12376	19448	24310	24310	19448
18	1	18	153	816	3060	8568	18564	31824	43758	48620	43758
19	1	19	171	969	3876	11628	27132	50388	75582	92378	92378
20	1	20	190	1140	4845	15504	38760	77520	125970	167960	184756

Примечание. Для $m > 10$ можно воспользоваться свойством симметрии: $C_n^m = C_n^{n-m}$

Практическое занятие 7

Надежность систем при резервировании

Цель – овладеть навыками проведения расчета надежности систем при разных видах резервирования.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть практического задания.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1–3.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Резервирование повышает надежность системы путем введения резервных элементов, являющихся избыточными по отношению к минимальной функциональной структуре системы, необходимой и достаточной для выполнения заданных функций.

Резервирование характерно тем, что оно позволяет повысить надежность системы по сравнению с надежностью составляющих ее элементов. Повышение надежности отдельно взятых элементов требует больших материальных затрат. В этих условиях резервирование, например, за счет введения дополнительных элементов является эффективным средством обеспечения требуемой надежности систем.

Если при последовательном соединении элементов общая надежность системы (т. е. вероятность безотказной работы) ниже надежности самого ненадежного элемента, то при резервировании общая надежность системы может быть выше надежности самого надежного элемента. Однако, с другой стороны, избыточные системы, получая высокую надежность, могут приобрести ряд свойств, которые снижают их эффективность, в частности, для избыточных систем характерны большие экономические затраты на сооружение и эксплуатацию.

Резервирование может быть достаточно сложным. На рис. 4.22 приведена классификационная схема, позволяющая наглядно представить связи в резервировании.

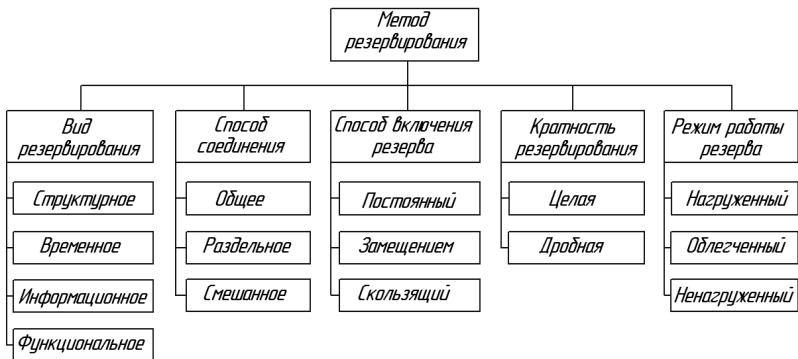


Рис. 4.22. Методы резервирования

Резервирование осуществляется путем введения избыточности. В зависимости от природы последней резервирование бывает:

- структурное (аппаратное);
- функциональное;

- информационное;
- временное.

Структурное резервирование — это использование избыточных элементов структуры объекта, т. е. элементов, которые являются необходимыми для выполнения возложенных на систему функций.

Функциональное резервирование — это использование способности элементов выполнять дополнительные функции, повышая надежность системы за счет перераспределения функций при отказах элементов.

Информационное резервирование предусматривает использование избыточной информации. Его простейшим примером является многократная передача одного и того же сообщения по каналу связи.

Временное резервирование предусматривает использование избыточного времени.

Существует два метода повышения надежности систем путем структурного резервирования:

- 1) общее резервирование, при котором резервируется система в целом;
- 2) раздельное (поэлементное) резервирование, при котором резервируются отдельные части (элементы) системы.

Обычно стремятся по возможности применять раздельное резервирование, т. к. при этом выигрыш в надежности часто достигается значительно меньшими затратами, чем при общем резервировании.

В зависимости от способа включения резервных элементов различают постоянное резервирование, резервирование замещением и скользящее резервирование.

Постоянное резервирование — это такое резервирование, при котором резервные элементы участвуют в работе объекта наравне с основными.

Резервирование замещением — это такое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного.

Скользящее резервирование представляет собой разновидность резервирования замещением, при котором основные элементы объекта резервируются элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший элемент.

Степень избыточности характеризуется кратностью резервирования. Кратность резерва — это отношение числа резервных элементов объекта к числу резервируемых ими основных элементов. Резервирование с целой кратностью имеет место, когда один

основной элемент резервируется одним или более резервными элементами. Резервирование с дробной кратностью – это такое резервирование, когда два и более однотипных элементов резервируются одним и более резервными элементами. Наиболее распространенным вариантом резервирования с дробной кратностью является такой, когда число основных элементов превышает число резервных. Резервирование, кратность которого равна единице, называется дублированием.

Расчеты надежности систем с параллельно включенными элементами зависят от способа резервирования.

Надежность систем при постоянном общем резервировании

На рис. 4.23 представлена схема постоянного общего резервирования.

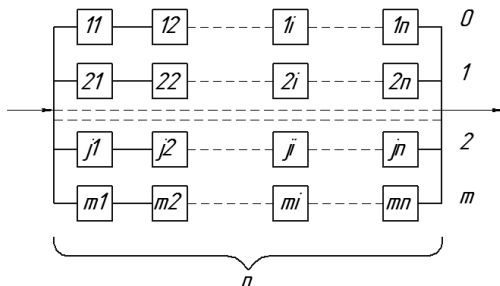


Рис. 4.23. Схема постоянного общего резервирования

Вероятность безотказности работы основной и каждой из m резервных цепей схемы будет равна

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (4.78)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента в j -й цепи.

Вероятность отказа этой цепи

$$Q_j(t) = 1 - P_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_i(t). \quad (4.79)$$

Вероятность отказа всей системы (основной и m параллельных цепей)

$$Q_{\Sigma}(t) = \prod_{j=1}^{m+1} Q_j(t) = \prod_{j=1}^{m+1} \left[1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) \right]. \quad (4.80)$$

Наконец, вероятность безотказной работы системы

$$P_{\Sigma}(t) = 1 - Q_{\Sigma}(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} \left[1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) \right]. \quad (4.81)$$

Полагая, что резервированная система составлена из одинаковых элементов $p_i(t) = p_j(t) = p$, $q_i(t) = q_j(t) = q$, перепишем выражения для определения вероятности безотказной работы

$$P_{\text{общ}} = 1 - (1 - p^n)^{m+1}, \quad (4.82)$$

тогда вероятность отказа

$$Q_{\text{общ}} = (1 - p^n)^{m+1} = [1 - (1 - q)^n]^{m+1}. \quad (4.83)$$

Надежность систем при постоянном раздельном резервировании

Схема замещения при постоянном раздельном резервировании представлена на рис. 4.24.

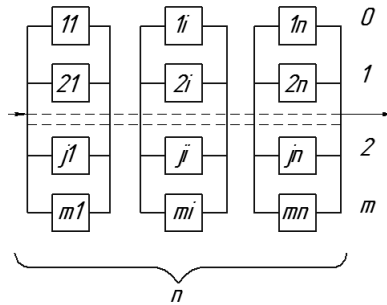


Рис. 4.24. Схема замещения при постоянном раздельном резервировании

Для этой схемы вероятность безотказной работы определится из выражения

$$P_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^{m+1} [1 - p_j(t)] \right\}, \quad (4.84)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента в j -й группе.

Полагая, что резервированная система составлена из одинаковых элементов, вероятность безотказной работы равна

$$P_{\text{разд}} = [1 - (1 - p)^{m+1}]^n, \quad (4.85)$$

тогда вероятность отказа

$$Q_{\text{общ}} = 1 - [1 - (1 - p)^{m+1}]^n = 1 - (1 - q^{m+1})^n. \quad (4.86)$$

Формулы расчета показателей надежности систем при постоянном резервировании

При постоянном резервировании резервные элементы постоянно включены и вместе с основными обеспечивают работоспособность системы. Если применяется дублированная система, то

$$[p_1(t) + q_1(t)] \cdot [p_2(t) + q_2(t)] = 1. \quad (4.87)$$

После перемножения

$$\underbrace{p_1(t)p_2(t) + p_1(t)q_2(t) + p_2(t)q_1(t)}_{P_{sp}(t)} + \underbrace{q_1(t)q_2(t)}_{Q_{sp}(t)} = 1 \quad (4.88)$$

Первые три слагаемых представляют собой вероятность безотказной работы дублированной системы, поскольку только четвертое слагаемое предполагает совместное пребывание в отказовом состоянии обоих элементов системы.

Если система составлена из двух элементов, обладающих экспоненциальным законом надежности, т. е.

$$\lambda_1(t) = const; \quad \lambda_2(t) = \lambda_2 = const, \quad (4.89)$$

то вероятность ее безотказной работы

$$P_{sp}(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}; \quad (4.90)$$

среднее время безотказной работы

$$T = \int_0^{\infty} P_{sp}(t) dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (4.91)$$

В частности, для дублированной системы ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$)

$$P_{sp}(t) = 2e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t}; \quad (4.92)$$

$$T = \frac{3}{2\lambda}. \quad (4.93)$$

При общем числе параллельно включенных элементов, равном трем

$$[p_1(t) + q_1(t)] \cdot [p_2(t) + q_2(t)] \cdot [p_3(t) + q_3(t)] = 1.$$

После перемножения (знак t опущен)

$$p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 q_3 + p_1 p_3 q_2 + p_2 p_3 q_1 + p_1 q_2 q_3 + p_2 q_1 q_3 + p_3 q_1 q_2 + q_1 q_2 q_3 = 1.$$

Здесь первое слагаемое $p_1 p_2 p_3$ — вероятность безотказной работы всех трех элементов в течение времени t . Сумма слагаемых вида ppq образует вероятность безотказной работы двух элементов в течение времени t , в то время как третий находится в состоянии отказа.

Сумма слагаемых вида pqq образует вероятность безотказной работы одного из элементов в течение времени t , в то время как два других находятся в состоянии отказа. Последнее слагаемое $q_1 q_2 q_3$ есть вероятность того, что в течение времени t отказали все три элемента.

Иногда необходимо определить минимальное число резервных элементов для обеспечения заданного уровня надежности технической системы.

При общем резервировании можно записать неравенство

$$1 - P_{\text{общ}} \leq (1 - p_i^n)^{m+1}. \quad (4.94)$$

Логарифмируя его, получаем

$$\lg(1 - P_{\text{общ}}) \leq (m + 1)\lg(1 - p_i^n). \quad (4.95)$$

Число резервных цепей

$$m \geq \frac{\lg(1 - P_{\text{общ}})}{\lg(1 - p_i^n)} - 1. \quad (4.96)$$

При раздельном резервировании можно записать соотношение

$$\sqrt[n]{P_{\text{разд}}} \leq 1 - (1 - p_i)^{m+1}. \quad (4.97)$$

После логарифмирования получаем

$$\lg(1 - \sqrt[n]{P_{\text{разд}}}) \leq (m + 1)\lg(1 - p_i); \quad (4.98)$$

$$m \geq \frac{\lg(1 - \sqrt[n]{P_{\text{разд}}})}{\lg(1 - p_i)} - 1. \quad (4.99)$$

Расчет надежности систем с резервированием

Выделяют несколько видов резервирования (временное, информационное, функциональное и др.). Для анализа структурной надежности ТС интерес представляет структурное резервирование – введение в структуру объекта дополнительных элементов, выполняющих функции основных элементов в случае их отказа.

Количественно повышение надежности системы в результате резервирования или применения высоконадежных элементов можно оценить по коэффициенту выигрыша надежности, определяемому как отношение показателя надежности до и после преобразования системы. Например, для системы из n последовательно соединенных элементов после резервирования одного из элементов (k -го) аналогичным по надежности элементом коэффициент выигрыша надежности по вероятности безотказной работы составит

$$G_p = \frac{P'}{P} = \frac{p_1 p_2 \dots p_{k-1} [1 - (1 - p_k)^2] p_{k+1} \dots p_n}{p_1 p_2 \dots p_{k-1} p_k p_{k+1} \dots p_n} = \frac{1 - (1 - p_k)^2}{p_k} = 2 - p_k. \quad (4.100)$$

Из формулы (4.100) следует, что эффективность резервирования (или другого приема повышения надежности) тем больше,

чем меньше надежность резервируемого элемента (при $p_k = 0,9$, $G_p = 1,1$, при $p_k = 0,5$, $G_p = 1,5$). Следовательно, при структурном резервировании максимального эффекта можно добиться при резервировании самых ненадежных элементов (или групп элементов).

Расчет количественных характеристик надежности систем с резервированием отдельных элементов или групп элементов во многом определяется видом резервирования. Ниже рассматриваются схемы расчетов для самых распространенных случаев простого резервирования, к которым путем преобразований может быть приведена и структура смешанного резервирования. При этом расчетные зависимости получены без учета надежности переключающих устройств, обеспечивающих перераспределение нагрузки между основными и резервными элементами (т. е. для «идеальных» переключателей). В реальных условиях введение переключателей в структурную схему необходимо учитывать и в расчете надежности систем.

Расчет систем с нагруженным резервированием осуществляется по формулам последовательного и параллельного соединения элементов аналогично расчету комбинированных систем. При этом считается, что резервные элементы работают в режиме основных как до, так и после их отказа, поэтому надежность резервных элементов не зависит от момента их перехода из резервного состояния в основное и равна надежности основных элементов.

Для системы с последовательным соединением n элементов при общем резервировании с кратностью l :

$$P_{об} = 1 - (1 - P)^{l+1} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i\right)^{l+1}. \quad (4.101)$$

В частности, при дублировании ($l = 1$)

$$P_{об} = 1 - (1 - P)^2 = P(2 - P). \quad (4.102)$$

При раздельном резервировании (рис. 4.25,б)

$$P_{раз} = \prod_{i=1}^n \left[1 - (1 - p_i)^{l+1}\right] \quad (4.103)$$

а при раздельном дублировании ($l = 1$)

$$P_{раз} = \prod_{i=1}^n \left[1 - (1 - p_i)^2\right] = \prod_{i=1}^n p_i(2 - p_i) = p \prod_{i=1}^n (2 - p_i). \quad (4.104)$$

Тогда коэффициенты выигрыша надежности по вероятности безотказной работы при дублировании

$$G_{об} = \frac{P_{об}}{P} = 2 - P, G_{раз} = \frac{P_{раз}}{P} = \prod_{i=1}^n (2 - p_i), \quad (4.105)$$

откуда следует, что раздельное резервирование эффективнее общего (например, для системы из трех одинаковых элементов при $p = 0,9$, $G_{об} = 1,27$, $G_{раз} = 1,33$).

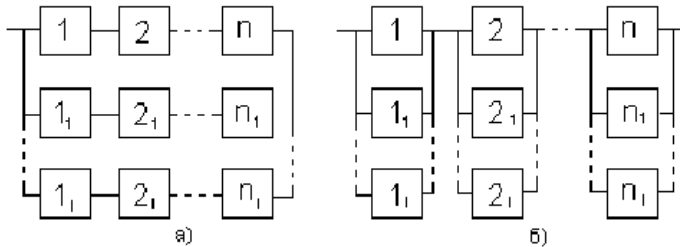


Рис. 4.25. Общее (а) и раздельное (б) резервирование

При ненагруженном резервировании резервные элементы последовательно включаются в работу при отказе основного, затем первого резервного и т. д. (рис. 4.26), поэтому надежность резервных элементов зависит от момента их перехода в основное состояние. Такое резервирование в различных ТС встречается наиболее часто, так как оно, по сути, аналогично замене отказавших элементов и узлов на запасные.

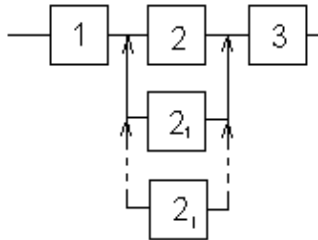


Рис 4.26. Ненагруженное резервирование

Если резервные элементы до их включения абсолютно надежны, то для системы с ненагруженным резервированием кратности l (всего элементов $l + 1$)

$$Q = \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} q_i; P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} (1 - p_i), \quad (4.106)$$

т. е. вероятность отказа в $(l + 1)!$ раз меньше, чем при нагруженном.

Для идентичных по надежности основного и резервного элементов

$$P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} (1 - p)^{l+1}. \quad (4.107)$$

При экспоненциальном распределении наработки (простейшем потоке отказов) в случае $\lambda t \ll 1$ можно воспользоваться приближенной формулой

$$P \approx 1 - \frac{(\lambda t)^{l+1}}{(l+1)!}. \quad (4.108)$$

При ненагруженном резервировании средняя наработка на отказ

$$T = \sum_{i=1}^{l+1} T_{0i}, \quad (4.109)$$

а для идентичных элементов $T_0 = nT_{0i}$.

Облегченное резервирование используется при большой инерционности переходных процессов, происходящих в элементе при его переходе из резервного в основной режим, и нецелесообразности применения нагруженного резервирования из-за недостаточного выигрыша в надежности (в РЭС это характерно для устройств на электровакуумных приборах). Очевидно, облегченный резерв занимает промежуточное положение между нагруженным и ненагруженным.

Точные выражения для расчета надежности систем при облегченном резервировании весьма громоздки и неоднозначны, однако при экспоненциальном распределении наработки справедлива приближенная формула

$$P = \frac{1}{(l+1)!} \lambda(\lambda + \lambda_0)(\lambda + 2\lambda_0) \dots [\lambda / \lambda_0] \cdot t^{l+1} = \frac{t^{l+1}}{(l+1)!} \prod_{i=0}^l (\lambda + i\lambda_0), \quad (4.110)$$

где λ_0 — интенсивность отказов элементов в облегченном режиме; l — кратность резервирования.

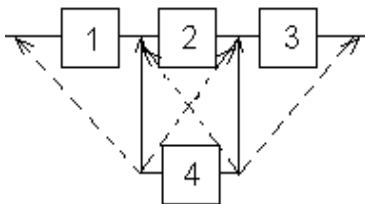


Рис. 4.27. Скользящее резервирование

Скользящее резервирование используется для резервирования нескольких одинаковых элементов системы одним или несколькими одинаковыми резервными (рис. 4.27, здесь все элементы идентичны, а элемент 4 — избыточный). Очевидно, отказ системы произойдет, если из общего количества идентичных элементов (основных и резервных) число отказавших превышает число

резервных. Расчет вероятности безотказной работы систем со скользящим резервированием аналогичен расчету систем типа « m из n ».

Пример 1. Определить вероятность бесперебойного электро-снабжения в течение года, если потребитель может питаться от трех источников с $\lambda = 0,1$ 1/год каждая:

- а) при условии, что достаточно по мощности одного источника;
- б) при условии, что достаточно по мощности двух источников.

Решение. Поскольку источники одинаковы

$$p_1(t) = p_2(t) = p_3(t) = e^{-0,1t} = 0,9048 \text{ и } q_1(t) = q_2(t) = q_3(t) = 1 - e^{-0,1t} = 0,0952$$

$$а) P_{zp}(1) = p^3 + 3p^2q + 3pq^2 = 0,9991; Q_{zp}(1) = q^3 = 0,0009;$$

$$б) P_{zp}(1) = p^3 + 3p^2q; Q_{zp}(1) = 3pq^2 + q^3;$$

$$в) P_{zp}(1) = e^{-0,3} + 3e^{-0,2}(1 - e^{-0,1}) = 3 \cdot 0,8187 - 2 \cdot 0,7408 = 0,9705; Q_{zp} = 0,0295.$$

Пример 2. Пусть система содержит 30 одинаковых элементов с $\lambda = 0,1$ 1/год, причем число элементов в цепи $n = 10$, число цепей основной и резервной $m + \backslash = 3$. Определить вероятность безотказной работы системы в течение года:

- а) при общем резервировании;
- б) при раздельном резервировании.

Решение. Элементы подчиняются экспоненциальному закону надежности

$$P(1) = e^{-0,1 \cdot 1} = e^{-0,1} = 0,9048; q(1) = 0,0952;$$

для определения вероятности безотказной работы при общем и раздельном резервировании воспользуемся выражениями:

$$P_{общ}(1) = 1 - (1 - e^{-0,1 \cdot 10})^3 \approx 0,7476; P_{разд}(1) = \left[1 - (1 - e^{-0,1})^3 \right]^{10} \approx 0,9914.$$

Пример 3. Система состоит из 10 последовательно включенных элементов, вероятность безотказной работы каждого элемента для одного и того же момента времени $p_i = 0,9$. Сколько необходимо резервных элементов при постоянном резервировании обоими способами (общем и раздельном) для того, чтобы вероятность безотказной работы системы составила $P_c = 0,95$.

Решение. Число резервных цепей (при $n = 10$)

$$m \geq \frac{\lg(1 - P_{общ})}{\lg(1 - P_i^n)} - 1 \geq \frac{\lg(1 - 0,95)}{\lg(1 - 0,9^{10})} - 1 \geq 5,9, \quad m = 6.$$

Следовательно, для обеспечения требуемой надежности необходимо 6 резервных цепей по 10 элементов в каждой, т. е. всего 60 элементов.

Определим теперь необходимое число резервных элементов при раздельном резервировании, для чего используем формулу

$$m \geq \frac{\lg(1 - \sqrt[m]{P_{\text{раз}}})}{\lg(1 - P_i)} - 1 \geq \frac{\lg(1 - \sqrt[10]{0,95})}{\lg(1 - 0,9)} - 1 \geq 0,9, \quad m = 1,$$

т. е. каждый основной элемент необходимо продублировать, а всего резервных элементов будет 10.

Таким образом, при раздельном резервировании в данном случае можно для той же надежности использовать в 6 раз меньше резервных элементов.

Пример 4. Увеличение надёжности (рис. 4.28) за счёт резервирования элементов.

Для элемента N (моста) резервирование означает увеличение большего числа элементов. B и C – наиболее значимые элементы в нём. Будем их улучшать наряду с первым элементом.

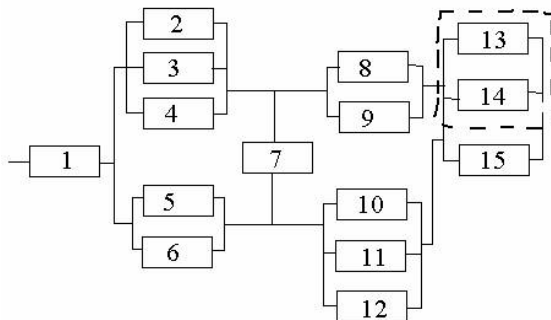


Рис. 4.28. Исходная схема

Для повышения надёжности моста добавляем параллельно к элементам B и C элементы до тех пор, пока вероятность безотказной работы квазиэлемента N не достигнет заданного значения.

P_N должна быть больше $P_N = 0,9539$.

1. Добавим параллельно по одному элементу к B и C :

$$P_N = 0,9522 < 0,9539.$$

2. Добавляем ещё по одному:

$$P_N = 0,9687 > 0,9539.$$

3. Добавим параллельно к первому элементу ещё один аналогичный:

$$P_1 = 1 - (1 - P_1) \cdot 2 = 21 - (1 - 0,9201) \cdot 2 = 0,9936 > 0,9574.$$

Результаты расчётов вероятностей безотказной работы системы N , 1 и системы в целом приведены в табл. 4.25.

Расчёты показывают, что при $t = 068325 \cdot 10^6$ ч $P_S = 0,9451 > 0,9$, что соответствует условию задачи.

Таблица 4.25

Результаты расчётов вероятностей безотказной работы системы

Элемент	Наработка								
	$\lambda_i \cdot 10^6$ ч	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,4	1,8	2,0
1	0,1	0,9802	0,9607	0,9417	0,9231	0,9048	0,8693	0,8353	0,8187
2''	—	0,8187	0,6703	0,5488	0,4493	0,3679	0,2466	0,1653	0,1353
C'', B''	1,0	0,9998	0,9961	0,9813	0,8724	0,8991	0,7573	0,5948	0,5167
1''	—	0,9996	0,9985	0,9966	0,9941	0,9909	0,9829	0,9729	0,9671
N''	—	0,9999	0,9995	0,9944	0,9323	0,9271	0,7407	0,4962	0,3837
S''	—	0,9984	0,9935	0,9813	0,9411	0,8954	0,6940	0,4477	0,3390

На рис. 4.29 представлена вероятность безотказной работы системы после структурного резервирования (кривая S).

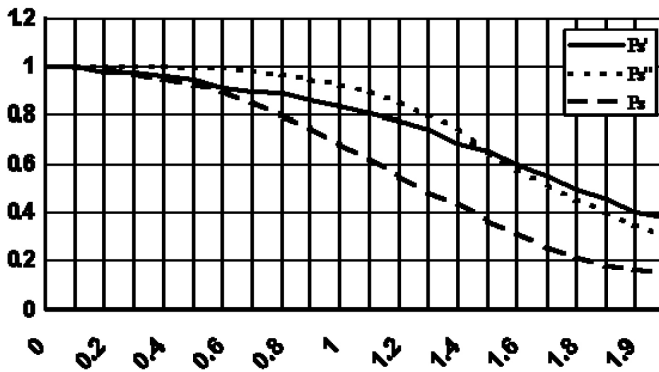


Рис. 4.29. График зависимости вероятности безотказной работы системы

Схема после структурного резервирования представлена на рис. 4.30.

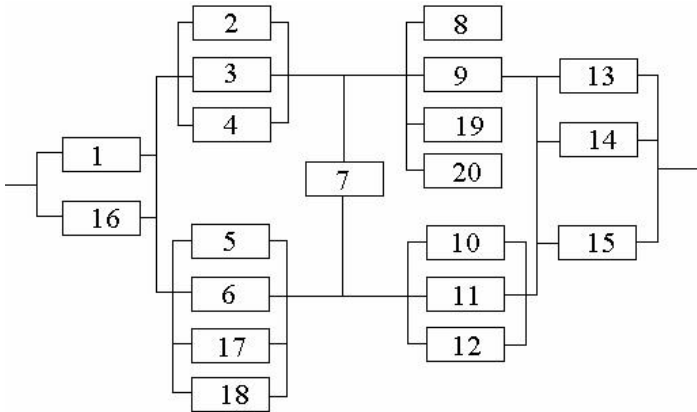


Рис. 4.30. Схема после структурного резервирования

Таким образом, для увеличения надёжности надо добавить элементы 16, 17, 18, 19, 20 (рис. 4.30).

Вывод: нагруженное резервирование основных элементов 1, 2, 3, 4, 5 и 6 идентичными по надёжности резервными элементами 16, 17, 18, 19 и 20.

Задания

1. Определить вероятность бесперебойной работы системы в течение двух лет, если потребитель может питаться от трех источников с интенсивностью отказов $\lambda = 0,2$ 1/год каждый:

- а) при условии, что достаточно по мощности одного источника;
- б) при условии, что достаточно по мощности двух источников.

2. Пусть система содержит 20 одинаковых элементов с $\lambda = 0,1$ 1/год, причем число элементов в цепи $n = 5$, число цепей основной и резервной равно 5. Определить вероятность безотказной работы системы в течение года:

- а) при общем резервировании;
- б) при раздельном резервировании.

3. Система состоит из 20 последовательно включенных элементов, вероятность безотказной работы каждого элемента для одного и того же момента времени $p_i = 0,85$. Сколько необходимо резервных элементов при постоянном резервировании обоими способами (общего и раздельного) для того, чтобы вероятность безотказной работы системы составила $P_c = 0,9$.

Практическое занятие 8

Логико-графический метод анализа надежности и риска технических систем

Цель — освоить логико-графический метод анализа надежности и риска технических систем на примере построения дерева отказов.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть практического задания.
2. В соответствии с данными выполнить задания 1 и 2.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Процедура анализа дерева отказов

Опасности носят потенциальный, т. е. скрытый характер. Условия реализации потенциальной опасности называются причинами.

Опасность — следствие некоторой причины или группы причин, которая, в свою очередь, является следствием другой причины, т. е. причины и следствия образуют иерархические структуры или системы, так называемые: «дерево событий», «дерево причин», «дерево отказов» или «дерево опасности», «дерево неисправностей».

Процедура построения дерева неисправностей (отказов) включает, как правило, следующие этапы.

1. Определение нежелательного (завершающего) события в рассматриваемой системе.
2. Тщательное изучение возможного поведения и предполагаемого режима использования системы.
3. Определение функциональных свойств событий более высокого уровня для выявления причин тех или иных неисправностей системы и проведение более глубокого анализа поведения системы с целью выявления логической взаимосвязи событий более низкого уровня, способных привести к отказу системы.
4. Построение дерева неисправностей (отказов) для логически связанных событий на входе. Эти события должны определяться в терминах идентифицируемых независимых первичных отказов. Чтобы получить количественные результаты для завершающего нежелательного события дерева, необходимо задать вероятность отказа, коэффициент неготовности, интенсивность отказов, интенсивность восстановлений и другие показатели, характеризующие первичные события, при условии, что события дерева неисправностей не являются избыточными.

Построение дерева отказов

Дерево отказов – это топологическая модель надежности и безопасности, которая отражает логико-вероятностные взаимосвязи между отдельными случайными исходными событиями в виде первичных отказов или результирующих отказов, совокупность которых приводит к главному анализируемому событию. Таким образом, дерево отказов – это ориентировочный граф в виде дерева.

Основной целью построения дерева неисправностей является символическое представление существующих в системе условий, способных вызвать ее отказ. Кроме того, построенное дерево позволяет показать в явном виде слабые места системы и является наглядным средством представления и обоснования принимаемых решений, а также средством исследования компромиссных соотношений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям.





Выделяют пять типов вершин дерева отказов (ДО):




- 1) вершины, отображающие первичные отказы;
- 2) вершины, отображающие результирующие или вторичные отказы;
- 3) вершины, отображающие локальные отказы, которые не влияют на возникновение других отказов;
- 4) вершины, соответствующие операции логического объединения случайных событий (типа «ИЛИ»);
- 5) вершины, соответствующие операции логического произведения случайных событий (типа «И»).

Символы, используемые при изображении дерева неисправностей, представлены в табл. 4.26.

Таблица 4.26

Символы, используемые при изображении дерева неисправностей

Символ	Наименование символа	Описание символа
	Вершина событий	Вершина событий, соответствующая неисправности системы
	Промежуточное событие	Промежуточное событие, соответствующее неисправности более высокого уровня, чем события основного уровня
	Основное событие	Основное событие, для которого имеется информация о надежности
	Неразработанное событие	Часть системы, которая не разработана

Символ	Наименование символа	Описание символа
	Клапан пере- хода	Клапан, указывающий, что эта часть системы разрабатывается в другой части или на другой странице диаграммы
	Клапан ИЛИ	Событие выхода происходит, если происходят все события входа одновременно
	Клапан И	Событие выхода происходит, если происходят все входные события одновременно

Каждой вершине ДО, отображающей первичный или результирующий отказ, соответствует определенная вероятность возникновения отказа. Одним из основных преимуществ ДО является то, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов систем и событий, которые приводят к постулируемому отказу или аварии. Чтобы определить вероятность отказа, необходимо найти аварийные сочетания, для чего необходимо произвести качественный и количественный анализ дерева отказов.

Структура «дерева отказа» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в узлах «деревьев» используются знаки «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

Обычно предполагается, что исследователь, прежде чем приступить к построению дерева неисправностей, тщательно изучает систему. Поэтому описание системы должно быть частью документации, составленной в ходе такого изучения.

В зависимости от конкретных целей анализа дерева неисправностей для построения последнего специалисты по надежности обычно используют либо метод первичных отказов, либо метод вторичных отказов, либо метод иницированных отказов.

Метод первичных отказов. Отказ элемента называется *первичным*, если он происходит в расчетных условиях функционирования системы. Построение дерева неисправностей на основе учета лишь первичных отказов не представляет большой сложности, так как

дерево строится только до той точки, где идентифицируемые первичные отказы элементов вызывают отказ системы. Для иллюстрации этого метода рассмотрим следующий пример.

Пример 1. Требуется построить дерево неисправностей для простой системы – комнаты, в которой имеются выключатель и электрическая лампочка. Считается, что отказ выключателя состоит лишь в том, что он не замыкается, а завершающим событием является отсутствие освещения в комнате.

Дерево неисправностей для этой системы показано на рис. 4.31. Основными, или первичными, событиями дерева неисправностей являются: (1) отказ источника питания E_1 ; (2) отказ предохранителя E_2 ; (3) отказ выключателя E_3 и (4) перегорание лампочки E_4 .

Промежуточное событие – прекращение подачи электроэнергии. Наибольший интерес представляет завершающее событие – «отсутствие света в комнате», и поэтому именно ему уделяется основное внимание при анализе. Дерево неисправностей, изображенное на рис. 4.31, показывает, что исходные события представляют собой входы схем ИЛИ: при наступлении любого из четырех первичных событий E_1, E_2, E_3, E_4 осуществляется завершающее событие (отсутствие света в комнате).

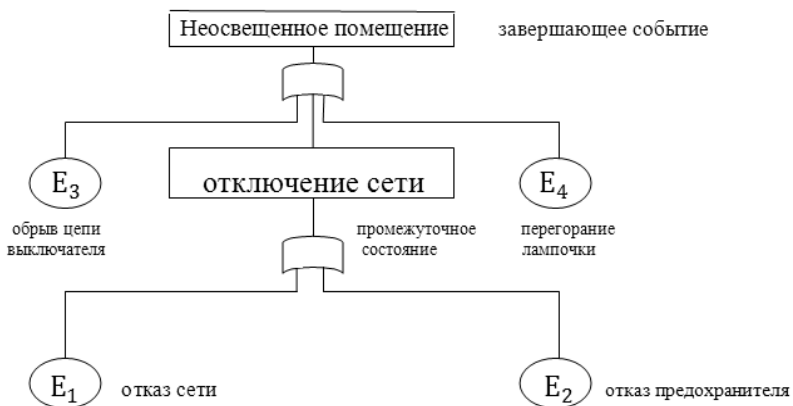


Рис. 4.31. Дерево неисправностей для случая первичных отказов

Метод вторичных отказов. Чтобы анализ охватывал и вторичные отказы, требуется более глубокое исследование системы. При этом анализ выходит за рамки рассмотрения системы на уровне отказов ее основных элементов, поскольку вторичные отказы вызываются неблагоприятным воздействием окружающих условий или чрезмерными нагрузками на элементы системы в процессе эксплуатации.

Метод иницированных отказов. Подобные отказы возникают при правильном использовании элемента, но в неустановленное время или в неполюженном месте. Другими словами, инициированные отказы – это сбой операций координации событий на различных уровнях дерева неисправностей: от первичных отказов до завершающего события (нежелательного либо конечного).

Пример 2. Типичным примером инициированного отказа является поступление ошибочного сигнала на какое-либо электротехническое устройство (например, двигатель или преобразователь). Взаимосвязь между основными и инициированными отказами показана на рис. 4.32.

Многообразие причин аварийности и травматизма наиболее полно и удобно представляется в виде диаграммы дерева причин, отражающей процесс появления и развития цепи предпосылок. Основными компонентами диаграммы причин или опасностей являются узлы (или вершины) и взаимосвязи между ними. В качестве узлов подразумеваются события, свойства и состояния элементов рассматриваемой системы, а также логические условия их трансформации (сложение «ИЛИ» и перемножение «И»).

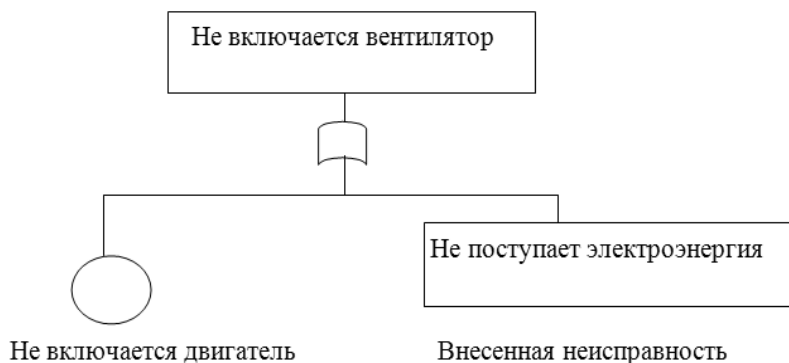


Рис. 4.32. Дерево неисправностей для случая основных и инициированных отказов

Операция «И» означает, что перед тем, как произойдет некоторое событие «А», должно быть несколько событий, например «В» и «В».

В вероятностном аспекте такая операция выражается логическим произведением:

$$P(\dot{A}) = P(\dot{B}) \cdot P(B). \quad (4.111)$$

Операция «ИЛИ» означает, что некоторое событие «Г» будет иметь место, если произойдет хотя бы одно из нескольких событий или все события, например, «Д» и «Е».

В этом случае вероятность появления события «Г» будет иметь вид алгебраической суммы:

$$D(\tilde{A}) = D(\tilde{A}) + D(\tilde{A}) - D(\tilde{A}) \cdot D(\tilde{A}) \quad (4.112)$$

Пример 3. Во дворе предприятия водитель тягача приступил к сцепке тягача с прицепом. Операция осложнилась из-за различной высоты тягача и прицепа, и водитель спустился вниз, чтобы выяснить причину, забыв поставить тягач на тормоз. Когда водитель находился между прицепом и тягачом, тягач с работающим двигателем скатился назад по небольшому уклону и придавил водителя к раме прицепа.

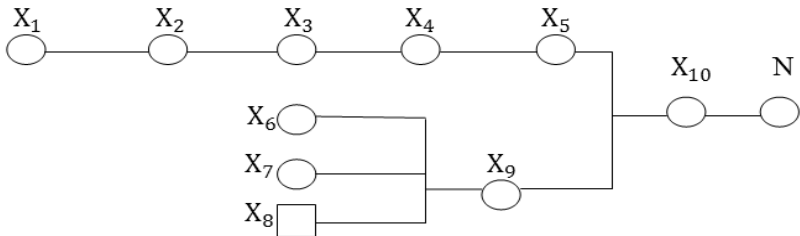


Рис. 4.33. Дерево причин аварии тягача:

- X_1 — обычно используемый тягач вышел из строя;
 - X_2 — другой тягач использовался в работе; X_3 — различие в высоте прицепа и нового тягача; X_4 — осуществление сцепки затруднено;
 - X_5 — водитель встает между тягачом и прицепом; X_6 — не включен ручной тормоз; X_7 — вибрации от работающего двигателя;
 - X_8 — двор имеет уклон; X_9 — тягач движется к прицепу;
 - X_{10} — водитель зажимается между прицепом и тягачом;
 - N — несчастный случай (травма)
- (X_8 — факт постоянного характера, все остальные — случайны)

Анализ происшествия состоит в выяснении причин несчастного случая, выявлении источников опасности и выработке предупредительных мероприятий. Результаты анализа приведены в табл. 4.27.

Результаты анализа происшествия

Причины несчастного случая	Источники опасности	Предупредительные мероприятия
Двор с уклоном	Неподходящие места стоянки	Реконструкция двора
Тягач, вышедший из строя	Поломка оборудования	Предупредительный ремонт транспортных средств
Разная высота прицепа и тягача	Техническая несовместимость оборудования	Стандартизация соединения оборудования
Неустановленный тормоз, работающий двигатель	Недостаточная подготовка персонала	Инструктаж водителей

Пример 4. На рис. 4.34 показана система последовательно соединенных элементов, которая включает насос и клапан, имеющие соответственно вероятности безотказной работы 0,98 и 0,95, а также приведено дерево решений для этой системы. Согласно принятому правилу верхняя ветвь соответствует желательному варианту работы системы, а нижняя — нежелательному. Дерево решений читается слева направо. Если насос не работает, система отказывает независимо от состояния клапана. Если насос работает, с помощью второй узловой точки изучается ситуация, работает ли клапан.

Вероятность безотказной работы системы $0,98 \times 0,95 = 0,931$.

Вероятность отказа $0,98 \times 0,05 + 0,02 = 0,069$, и суммарная вероятность двух состояний системы равна единице. Этот результат можно получить другим способом с помощью таблицы истинности (табл. 4.28).

Таблица 4.28

Таблица истинности

Состояние насоса	Состояние клапана	Вероятность работоспособного состояния системы	Вероятность отказа системы
Работает	Работает	0,98×0,95	0,02×0,95
Отказ	Отказ		0,98×0,05
Работает	Отказ		0,02×0,05
Суммарная величина		0,931	0,069

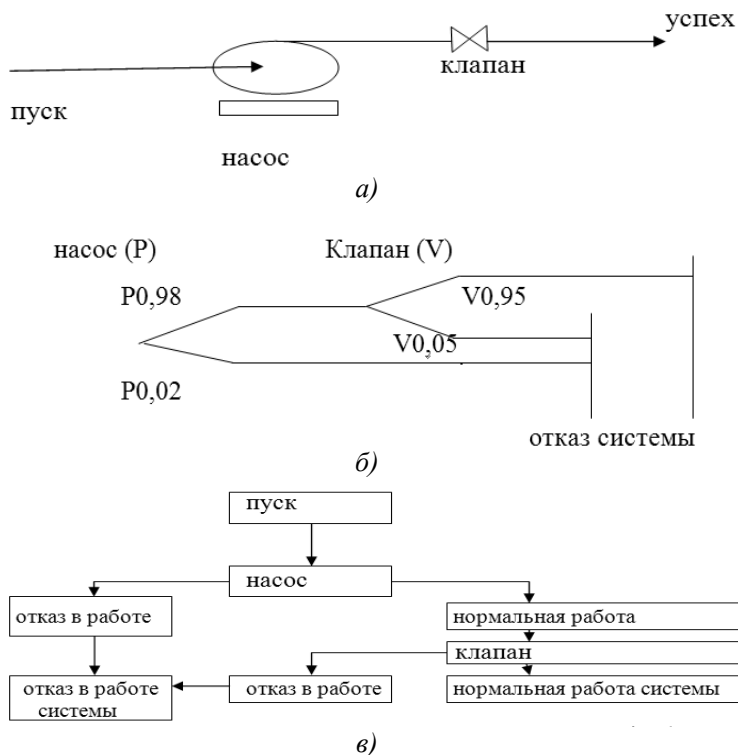


Рис. 4.34. Дерево решений для двухэлементной схемы (работа насоса):
 а) принципиальная схема; б) дерево решений; в) диаграмма решений

Методы анализа деревьев – наиболее трудоемки, они применяются для анализа проектов или модернизации сложных технических систем и производств и требуют высокой квалификации исполнителей.

Задания

1. На рис. 4.35 показано простое дерево неисправностей с завершающим событием «прекращение выработки электроэнергии генератором». Дерево отказов отображает такие первичные события, как отказ выключателя (отсутствие замыкания), неисправности внутренних цепей двигателя, источника питания и предохранителя. Вторичные отказы изображаются прямоугольником как промежуточное событие.

Вторичные отказы, изображенные на рис. 4.35, происходят вследствие неудовлетворительного технического обслуживания,

неблагоприятного воздействия внешней среды, стихийного бедствия и т. д.

Проведите анализ надежности технической системы по представленному на рис. 4.35 дереву отказов.



Рис. 4.35. Дерево неисправностей для случая вторичных отказов

2. Гибель человека от электрического тока может произойти при включении его тела в электрическую цепь с достаточной для этого силой тока. Следовательно, чтобы произошел несчастный случай (головное событие «А»), необходимо одновременное существование трех условий (рис. 4.36).

Условие «Б» — наличие потенциально высокого напряжения на корпусе электрической установки.

Событие «В» означает появление человека на токопроводящем основании, соединенном с землей.

Событие «Г» — касание телом человека корпуса электроустановки.

В свою очередь, событие «Б» может быть следствием любого из двух событий-предпосылок «Д» и «Е», где «Д» — понижение сопротивления изоляции токоведущих частей, а событие «Е» — касание ими корпуса установки.

Событие «В» также обуславливается двумя предпосылками: «Ж» — вступление человека на токопроводящее основание и «З» — касание его туловищем заземленных элементов помещения.

Событие «Г» является результатом появления одной из трех предпосылок: «И» — потребность ремонта, «К» — потребность техобслуживания и «Л» — использование электроустановки по назначению, или нормальная эксплуатация установки.

Представьте аналитическое выражение условия реализации данного несчастного случая, основываясь на дереве причин поражения человека электрическим током.

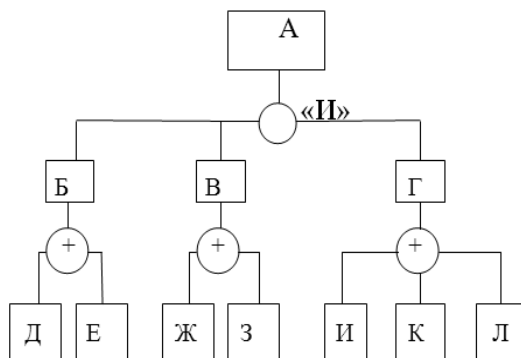


Рис. 4.36. Дерево причин поражения человека электрическим током

Практическое занятие 9

Риск промышленных предприятий и его оценка

Цель – получить практические навыки по анализу риска на опасных производственных объектах.

Алгоритм выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть практического задания.
2. В соответствии с данными выполнить задание 1.
3. Составить отчет по работе, содержащий все пункты выполнения задания.

Общие сведения

Любой технический объект, имеющий или использующий искусственный запас энергии, потенциально опасен. К тому же скорость нарастания численности технических объектов в техносфере сопоставима или больше общего возрастания их надежности (хотя вновь строящиеся ОПО и имеют более высокую надежность, однако надежность эксплуатирующихся ОПО только снижается со временем).

Для рассмотрения причин современного состояния аварийности и травматизма необходимо определиться в используемых ниже понятиях и терминах. Примем в качестве рабочих нижеперечисленные определения.

Опасность — возможность причинения ущерба (вреда) кому-либо или чему-либо.

Ущерб — качественное и/или количественное изменение свойств рассматриваемого объекта в худшую сторону.

Риск — мера опасности.

Для ОПО риск эксплуатации R в самом первом приближении может быть количественно оценен математическим ожиданием ущерба Y при функционировании ОПО:

$$R = M[Y] \quad (4.113)$$

Определим и обозначим также следующие события:

событие A — авария на ОПО (нерасчетное внезапное высвобождение энергии);

событие C_i — реализация аварии по i -му сценарию;

событие B_i — причинение ущерба y_i ОПО и/или сторонним объектам.

Тогда формулу (4.113) можно представить следующим образом:

$$R = M[Y] = \sum P(B_i) \cdot y_i, \quad (4.114)$$

где $P(B_i)$ — вероятность причинения ущерба y_i при эксплуатации ОПО.

Формулу (4.114) полезно разбить на два слагаемых — риск аварии R_A и штатные потери R_{ϕ} , т. е.:

$$R = R_a + R_{\phi} = \sum P(B_i) \cdot y_i + [P(B_i) \approx 1] \sum y_j, \quad (4.115)$$

где y_j — размер средних ущербов, причиняемых ОПО и/или сторонним объектам при штатном функционировании ОПО. К основным из них относят убытки от хозяйственной деятельности $Y_{\phi \dot{y} i}$ и платы за загрязнение окружающей природной среды $Y_{\dot{y} i \dot{N}}$.

Оценка величины $Y_{\dot{y} i \dot{N}}$ на стадии проектирования проводится, как правило, с помощью процедуры ОВОС (оценка воздействия предполагаемой деятельности на окружающую среду), а на стадии эксплуатации — с помощью действующих индивидуальных нормативно-разрешительных документов ОПО — томов ПДВ, ПДС и лимитов размещения отходов. Оценка величины $Y_{\phi \dot{y} i}$ на стадии проектирования проводится с помощью процедуры ТЭО (технико-экономического обоснования намечаемой деятельности), а на стадии эксплуатации — с помощью аудита финансово-экономического характера.

Оценка же величины риска аварии $R_a = \sum P(B_i) \cdot y_i$ как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации ОПО проводится главным образом в рамках процедуры декларирования промышленной безопасности ОПО.

Кратко остановимся на традиционных методах оценки риска аварии R_A . Для этого сначала определим событие B_i через события A и C_i (определения см. выше):

$$B_i = A \cap C_i. \quad (4.116)$$

Так как события A и C_i являются совместными, то искомая вероятность события, связанного с причинением ущерба y_i при эксплуатации ОПО, определяется как:

$$P(B_i) = P(A \cap C_i) = P(A) \cdot P(C_i | A). \quad (4.117)$$

Подставляя выражение (4.117) в формулу (4.115), получим:

$$R = R_a + R_u = \sum P(A) \cdot P(C_i | A) \cdot y_i + Y_{оос} + Y_{тэо} \quad (4.118)$$

или в более сжатом виде для риска аварии R_A :

$$R_a = \sum P(A) \cdot P(C_i | A) \cdot y_i = [P(A)] \cdot [\sum P(C_i | A) \cdot y_i] \quad (4.119)$$

Первый член $[P(A)]$ произведения выражения (4.119) описывает причинные составляющие риска аварии R_A , а второй член $[\sum P(C_i | A) \cdot y_i]$ – последствия возможной аварии.

Оценка последствий возможных аварий на ОПО (т. е. нахождение в выражении (4.119) второго члена) является в настоящее время достаточно изученным вопросом – существуют многочисленные методики оценки последствий промышленных аварий, которые широко применяются на практике. В большинстве своем они базируются на методах анализа «дерева событий» – сценариев развития аварии (рис. 4.37) совместно с моделями поражения.

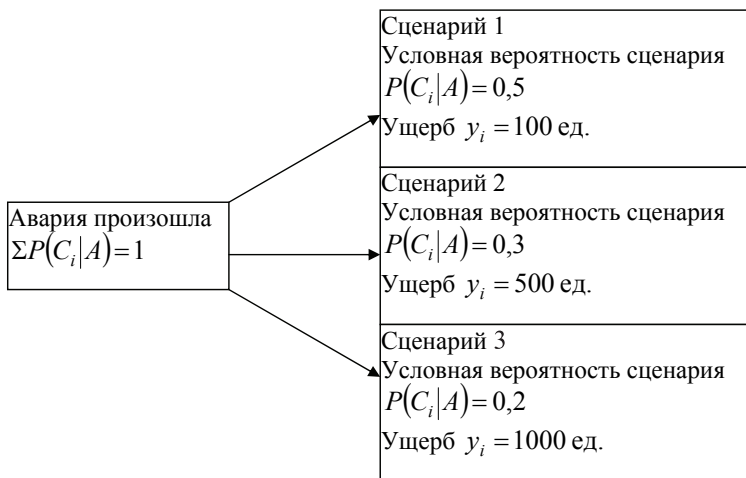


Рис. 4.37. Дерево исходов аварии

Таким образом, анализ последствий возможных аварий привязан к конкретному объекту и отражает его индивидуальную специфику (место расположения, энергетические запасы, особенности технологии и т. д.).

Сложнее обстоит дело с оценкой величины вероятности возникновения самой аварии — $P(A)$. Существующие методики (главным образом «дерево отказа») оценки величины $P(A)$ сложны и трудоемки в основном из-за отсутствия, неточности и неопределенности исходных данных. Поэтому на практике обычно величину $P(A)$ принимают как среднестатистическую по отрасли для данного типа ОПО, что, к сожалению, не отражает специфику отдельного ОПО. К тому же из рассмотрения выпадает целый класс причин возникновения аварий, связанных с «человеческим фактором». Соответственно становится затруднительным рекомендовать индивидуальные меры безопасности, направленные на снижение вероятности возникновения аварии для конкретного ОПО, хотя, как показывает практика, меры по снижению вероятности аварии на 2–3 порядка эффективнее мер, направленных на снижение возможных ущербов по критерию «затраты-результаты».

В силу объективных и субъективных причин величина $P(A)$ в явном виде не применяется широко на практике, как количественный показатель при анализе риска аварии ОПО. К объективным причинам можно отнести высокую трудоемкость точной оценки $P(A)$, так как объект исследования (ОПО) является сложной дискретной системой. Одной из основных субъективных причин является механистическое распространение методов теории надежности, применимых к отдельным узлам и элементам, для анализа безопасности ОПО в целом как сложных систем. Некорректность такого подхода проявляется в том, что теория надежности, как и любая другая теория, имеет свою область применения, которая ограничена успешным решением поставленных задач только для отдельных простых элементов и технических узлов, но никак не для сложных систем.

Привычка оперировать «знакомыми» и «удобными» количественными характеристиками из теории надежности (безотказность, наработка на отказ и прочее) приводит к тому, что зачастую при анализе риска аварии употребляется термин «вероятность (частота) аварии» с размерностью 1/год. Попробуем выяснить основные причины его появления, а также корректность употребления в различных случаях. Условимся далее обозначать величину, характеризующую повторяемость события-аварии, как λ (1/год).

Во-первых, λ легко вычислить для некоторой отраслевой совокупности действующих объектов, если известна статистика аварий по отрасли за несколько последних лет:

$$\lambda = \frac{\text{число аварий}}{(\text{число объектов} \times \text{период рассмотрения})}. \quad (4.120)$$

Отметим, что говорить об устойчивости величины λ не приходится, так как интенсивность зависит от периода рассмотрения и в общем случае имеет существенные колебания в силу редкости событий-аварий и ограниченности средней продолжительности эксплуатации ОПО, составляющей около 50 лет. Статистическая устойчивость величины λ является приемлемой только для некоторых типов ОПО, например для линейной части магистральных трубопроводов, вследствие их большой протяженности (т. е. «мно-го объектов» по отрасли).

Оцененная подобным образом среднеотраслевая характеристика $\lambda_{\text{отд}}^{\text{отд}}$ не отражает индивидуальность ОПО, а поэтому затруднительно ранжировать ОПО по степени опасности и, следовательно, рекомендовать внедрение адресных мер безопасности на определенных ОПО в первую очередь, то есть в конечном счете эффективно расходовать и распределять ресурсы на совершенствование безопасности.

Но возвратимся к самому факту применения на практике величины, характеризующей повторяемость аварий на ОПО λ [1/год], что приводит к некоторым неточностям, недопониманию и искажениям. Например, ГОСТ 12.1.010-76 устанавливает вероятность взрыва на нефтяном промысле как величину, равную $1 \cdot 10^{-6}$ (1/год). В ГОСТ Р 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов» также используются аналогичные величины.

Такую же размерность имеет и средняя интенсивность аварий на ОПО, которая линейно зависит от средней интенсивности выполняемых на ОПО работ I_n , т. к. $P(A) = \text{const}$ для «идеального» ОПО в силу свойства устойчивости частоты, поэтому:

$$\lambda = P(A) \cdot I_n. \quad (4.121)$$

В качестве временного периода усреднения обычно принимают 1 год. Это связано как с редкостью аварийных событий, так и с периодичностью представления отчетов надзорными органами.

Теперь рассмотрим вопрос о величине повторяемости аварий λ (1/год) как о плотности распределения вероятности, что, скорее всего, отражено в вышеприведенных ГОСТах. Такой подход является «наследием» теории надежности, в которой вероятность отказов

отдельных элементов оценивается с помощью математического аппарата случайных величин теории вероятностей. В качестве случайной величины выбирается момент времени наступления отказа t или интервал времени между двумя последовательными отказами Δt (оценивается в часах для простых элементов). Имея статистические оценки этих случайных величин, легко вычислить другие важные в теории надежности показатели (безотказность, наработка на отказ и др.).

Установив функцию распределения случайных величин t или Δt , можно вычислить вероятность наступления отказа за какой-то промежуток времени. Рассмотрим характерные плотности распределения вероятностей случайных величин t (или Δt) для простого элемента (узла) и для ОПО как сложного объекта.

Известно, что вероятность $P_k(\Delta t)$ наступления ровно k событий-отказов для простого элемента (узла) за интервал времени Δt выражается законом распределения Пуассона:

$$P_k(\Delta t) = (\lambda \Delta t)^k / k! \cdot e^{-\lambda \Delta t}. \quad (4.122)$$

Из (4.122) следует, что функция плотности вероятности случайной величины Δt для простейшего потока событий-отказов имеет вид показательного (экспоненциального) распределения с параметром λ :

$$f(\Delta t) = \lambda e^{-\lambda \Delta t}, \quad (4.123)$$

где λ трактуется как интенсивность (плотность) потока событий-отказов.

Тогда

$$P(t) = \int \lambda e^{-\lambda \Delta t}. \quad (4.124)$$

Если предположить, что аналогичное распределение характерно и для ОПО, то область ординат, принимаемых в рассмотрение при анализе риска ОПО, будет находиться очень близко к началу координат. При условии известной малости величин интенсивности λ и вероятности аварий $P(A)$ можно пренебречь видом функции плотности вероятности $f(\Delta t)$ на интересующем нас участке и принять ее постоянной, т. е. $f(\Delta t) = \lambda$. Тогда справедливы следующие соотношения:

$$P_{\Delta t}(A_t) = \lambda \cdot [\Delta t = 1 \text{ год}], \quad (4.125)$$

где $P_{\Delta t}(A_t)$ – это вероятность события A_t : наступление аварии в течение года. Заметим, что $P_{\Delta t}(A_t)$ – безразмерная величина и численно совпадает с интенсивностью аварий на ОПО – λ (именно поэтому их часто и путают). Но как мы выяснили выше, нам

всегда известна функция плотности вероятностей интервалов времени между отказами — она постоянна и равна λ , при $\lambda \cdot \Delta t < 0,01$ формула (4.123) преобразуется в $f(\Delta t) = \lambda \cdot \Delta t$. Поэтому безусловная необходимость использования аппарата случайных величин t (или Δt) не всегда обоснованна и более того «вредна», т. к. создается «научная» путаница в понятиях и терминах, используемых в промышленной безопасности. Если уж идти этим путем, то необходимо учитывать, что для ОПО как сложной системы функция плотности вероятности $f(\Delta t)$ не является экспоненциальной на всей области определений и скорее выглядит, как представлено на рис. 4.38.

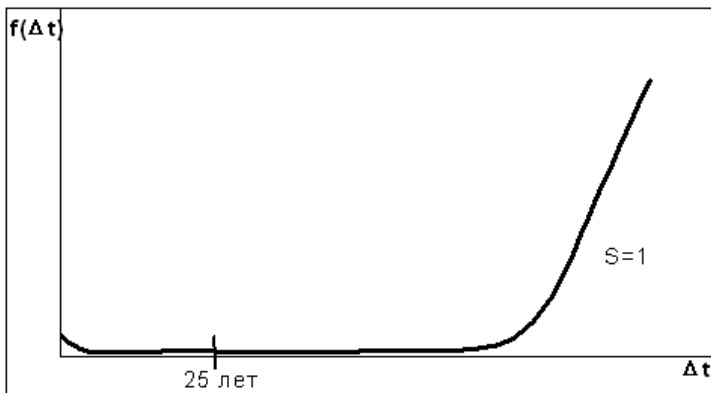


Рис. 4.38. Плотность вероятности интервалов времени между авариями для ОПО (кривая Мабута)

То есть функция плотности распределения интервалов между временем наступления аварии $f(\Delta t)$ на ОПО для интересующего участка (время жизни ОПО) нисколько не помогает нам в определении вероятности аварии, а только лишь указывает на то, что необходимо каким-то образом оценивать интенсивность аварий λ . Величину же интенсивности аварий λ можно оценить, опираясь на соотношение (4.121), или принять по существующей статистике (4.120).

В качестве обобщающего итога приведем краткие выводы по обсуждаемой проблеме:

1. Риск есть мера опасности и численно может выражаться математическим ожиданием ущерба (вреда) при функционировании ОПО (подобно тому, как в механике масса тела является мерой инертности).
2. При анализе риска используются понятия «интенсивность», «частота» и «вероятность» аварии, которые в силу редкости

событий-аварий численно совпадают, но имеют различные размерности:

- интенсивность аварий λ (1/год) – плотность потока событий-аварий во времени, прямо пропорциональна интенсивности работ I_n с коэффициентом пропорциональности, равным $P(A)$. Традиционно под интенсивностью понимают частоту во времени (за год);

- частота (частость) аварии [безразмерная величина] – статистическая оценка вероятности аварии $P(A)$, равная отношению интенсивности аварий λ к интенсивности работ I_n на ОПО;

- вероятность аварии $P(A)$ [безразмерная величина] – числовая характеристика уровня опасности конкретного ОПО; одна из основных составляющих риска аварии.

Задание

1. При аварии на химически опасном объекте произошло разрушение емкости с химически опасным веществом. Облако распространяется в направлении ветра, постепенно рассеиваясь по мере удаления от эпицентра аварии. В каком случае последствия при аварии будут наиболее тяжелыми?

Таблица 4.25

Время работы ХОО, лет	0–10	10–15	0–25	1–5
Погодные условия	Инверсия	Изотермия	Конвекция	Инверсия
Масса выброса ХОВ, тонн	0,2	1	0,5	0,75

При этом место расположения жилых кварталов для всех вариантов одинаково – на расстоянии 5 км от ХОО, население 400 тыс. человек. Просчитать риск возникновения аварии, используя формулу (4.124), а также определить плотность риска $f(t)$, используя рис. 4.38. Построить дерево исходов аварии по всем вариантам (не учитывая ущерб) аналогично рис. 4.37.

ТЕСТЫ

1. Использование способности элементов выполнять дополнительные функции, повышая надежность системы за счет перераспределения функций при отказах элементов, – это...

- 1) структурное резервирование;
- 2) функциональное резервирование;

- 3) информационное резервирование;
 - 4) временное резервирование.
2. Сопоставьте термины с определениями:
- 1) постоянное резервирование;
 - 2) резервирование замещением;
 - 3) скользящее резервирование;
 - а) разновидность резервирования замещением, при котором основные элементы объекта резервируются элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший элемент;
 - б) это такое резервирование, при котором резервные элементы участвуют в работе объекта наравне с основными;
 - в) это такое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного.
3. Дублирование – это резервирование, кратность которого:
- 1) равна 1;
 - 2) равна 2;
 - 3) равна 3;
 - 4) равна 4.
4. Кратность резерва – это:
- 1) отношение числа резервируемых основных элементов объекта к числу резервных элементов;
 - 2) отношение числа резервных элементов объекта к числу резервируемых ими основных элементов;
 - 3) произведение числа резервных элементов объекта и числа резервируемых ими основных элементов;
 - 4) разность числа резервных элементов объекта и числа резервируемых ими основных элементов.
5. Какого режима резерва работы не существует?
- 1) временный;
 - 2) облегченный;
 - 3) нагруженный;
 - 4) ненагруженный.
6. Внезапные отказы возникают:
- 1) в результате скачкообразного изменения значений параметров объекта;

- 2) в результате постепенного изменения значений параметров объекта;
- 3) в результате резкого изменения значений параметров объекта;
- 4) в результате кратковременного изменения значений параметров объекта;
- 5) в результате многократного изменения значений параметров объекта.

7. Статистически интенсивность отказов определяется по формуле:

$$1) \lambda(t) = 1 - e - \lambda t;$$

$$2) \lambda(t) = e - \lambda t;$$

$$3) \lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t};$$

$$4) \lambda(t) = \frac{dP(t)}{dt} = \lambda e - \lambda t;$$

$$5) \lambda(t) = \frac{df(t)}{ft}$$

8. Надежность состоит из сочетания следующих составляющих:

- 1) интенсивность, восстанавливаемость, ремонтпригодность, работоспособность;
- 2) безотказность, восстанавливаемость, постоянство, сохраняемость;
- 3) интенсивность, долговечность, постоянство, работоспособность;
- 4) безотказность, восстанавливаемость, ремонтпригодность, работоспособность;
- 5) безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

9. Перемежающийся отказ – это:

- 1) однократно возникающий самоустраняющийся отказ объекта одного и того же характера;
- 2) многократно возникающий отказ объекта одного и того же характера;
- 3) однократно возникающий отказ объекта одного и того же характера;

- 4) многократно возникающий самоустраниющийся отказ объекта одного и того же характера;
- 5) многократно возникающий внезапный отказ объекта.
10. Плотность вероятности отказа определяется по формуле:
- 1) $f(t) = e - \lambda t$;
 - 2) $f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda e - \lambda t$;
 - 3) $f(t) = \frac{1}{\lambda}$;
 - 4) $f(t) = 1 - e - \lambda t$;
 - 5) $f(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}} \Delta t}$.

Контрольные вопросы

1. Назовите наиболее часто нормируемые показатели надёжности восстанавливаемых изделий.
2. Как называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к числу испытываемых изделий при условии, что все изделия восстанавливаемые, а вышедшие из строя заменяются исправными?
3. Как называется среднее значение времени между соседними отказами восстанавливаемых изделий?
4. Как называется отношение времени исправной работы к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев восстанавливаемых изделий, взятых за один и тот же календарный срок?
5. Как называется отношение вынужденного простоя к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев восстанавливаемых изделий, взятых за один и тот же календарный срок?
6. Напишите формулу для статистической оценки коэффициента готовности.
7. Чему равна сумма коэффициента готовности и коэффициента вынужденного простоя?
8. Является ли функцией времени работы восстанавливаемого изделия коэффициент готовности?
9. Как называется вероятность застать восстанавливаемое изделие в исправном состоянии в любой момент времени?
10. Зависит ли функция времени восстанавливаемого изделия от времени работы изделия?

11. Назовите три периода работы, характерные для любого технического изделия.

12. Как называются отказы изделия в период приработки?

13. Какому закону распределения подчиняются отказы в период приработки?

14. Для чего проводят технологическую приработку изделия?

15. Как называются отказы изделия в период нормальной эксплуатации?

16. Какому закону распределения подчиняются отказы в период нормальной эксплуатации?

17. Какое соединение элементов имеет техническое устройство, если отказ устройства наступает после отказа одного из его элементов?

18. Чему равна вероятность безотказной работы изделия при основном соединении его элементов?

19. Как влияет резервирование на показатели надёжности: повышает их, понижает или не влияет на показатели надёжности?

20. Что является основным параметром резервирования?

21. На какие виды делится резервирование по способу его включения?

22. В каких состояниях могут находиться резервные элементы до включения их в работу при включении резерва по способу замещения?

23. Как вычисляется вероятность безотказной работы резервированного устройства, если его элементы имеют отказы вида «короткое замыкание» или «обрыв»?

ОТВЕТЫ НА ТЕСТЫ

Ответы на тесты модуля 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1	1	2	1	2	1	2	3	1

Ответы на тесты модуля 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3	2	3	3	1	1)–в 2)–а 3)–б 4)–г	1)–г 2)–а 3)–б 4)–в	3	1	2	3	1	2	3

Ответы на тесты модуля 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1–а 2–в 3–г 4–б	1–в 2–а 3–б 4–г	1–г 2–а 3–д 4–б 5–в	3	2	2	1–в 2–г 3–а 4–б	1–в 2–а 3–б	2	1	1–в 2–б 3–г 4–а	1–г 2–а 3–в 4–б	1–а 2–б

Ответы на тесты модуля 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1) б 2) в 3) а	1	2	1	1	3	5	4	2

ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Анализ надежности и техногенного риска систем типа «человек – машина – среда».
2. Ущерб, причиняемый техногенными и природными катастрофами.
3. Задачи специалистов по надежности технических систем.
4. Статистическая оценка законов распределения: состоятельные, несмещенные, эффективные, достаточные.
5. Статистическая оценка законов распределения: определение неизвестных параметров распределения, критерий Колмогорова в задачах надежности.
6. Оптимальное управление эксплуатационными процессами.
7. Влияние обслуживания на надежность технической системы.
8. Оценка надежности техники по опытным данным и данным эксплуатации.
9. Статистическое моделирование и решение задач эксплуатации сложных систем.
10. Сущность и обоснование метода статистического моделирования. Разыгрывание случайных величин.
11. Повышение надежности в результате проведения эксплуатационных мероприятий.
12. Построение алгоритма, имитирующего поведение системы.
13. Общие понятия в связи с риском.
14. Риск, связанный с техникой. Индивидуальный риск, коллективный риск.
15. Современные аспекты риска.
16. Статистические данные по риску.
17. Условие безопасности.
18. Подход к анализу риска при наличии опасных факторов.
19. Подход к анализу риска при наличии вредных факторов.
20. Оценка техногенного риска с двумя состояниями.
21. Теории и модели происхождения и развития несчастных случаев, аварий, катастроф.
22. Современные теории и модели происхождения и развития несчастных случаев, аварий, катастроф.
23. Модель развития ЧП по типу домино.
24. Энергетическая модель развития ЧП.
25. Модели развития ЧП с учетом человеческого фактора.
26. Методы качественного анализа надежности и риска СЧМС.

27. Алгоритмы анализа надежности и риска.
28. Методы количественного анализа надежности и риска.
29. Анализ опасностей с использованием графов.
30. Анализ опасностей деревом причин потенциального ЧП.
31. Анализ опасностей деревом последствий потенциально-го ЧП.
32. Основные дискретные и непрерывные распределения.
33. Применение дискретных и непрерывных распределений к задачам определения надежности и риска СЧМС.
34. Основные типы структур сложных систем с точки зрения надежности и опасности.
35. Особенности составления структурной схемы систем.
36. Резервирование: определение, классификация.
37. Подсистемы и ЧП И-ИЛИ, ИЛИ-И.
38. Оптимальные модели эксплуатации систем с резервированием.
39. Алгоритм анализа надежности более сложных систем.
40. Резервирование как способ повышения надежности.
41. Нагруженное резервирование. Ненагруженное резервирование.
42. Резервирование с восстановлением. Результаты для дублирования системы.
43. Расчет надежности при основном, резервном и смешанном соединениях.
44. Виды резервирования и их сравнительная оценка.
45. Расчет надежности систем с резервированием.
46. Анализ источников аварийной опасности и оценка риска кризисных ситуаций на основе построения дерева отказов.
47. Прогнозирование расхода запасных частей для устранения отказов.
48. Составление графа состояний.
49. Зависимость надежности от времени.
50. Схемно-логический метод.
51. Анализ последствий аварий.
52. Причинно-следственный анализ опасностей.
53. Расчет резервированных восстанавливаемых систем.
54. Деревья отказов. Последовательность операций при построении деревьев отказов.
55. Основы логико-вероятностных методов.
56. Методы повышения надежности.
57. Оценка и расчет риска. Основные формулы и соотношения.
58. Применение нечетких множеств при расчете риска.

59. Организационные механизмы и структура управления проблемой надежности технических систем и техногенного риска.

60. Основы государственной и международной политики применительно к этой сфере, комбинированная защита сложных технических систем.

ТЕМЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Виды и характеристики изнашивания. Механическое изнашивание.
2. Факторы, влияющие на процесс изнашивания, сущность этого влияния.
3. Составление статистического ряда исходной информации.
4. Графические методы определения параметров закона распределения отказов.
5. Графическое изображение опытной информации. Выбор теоретического закона распределения.
6. Оценка совпадения опытного и теоретического законов распределения показателей надежности по критерию согласия.
7. Графическое построение опытного распределения износ. Выбор теоретического закона распределения
8. Критерии согласия (Пирсона, Колмогорова).
9. Методика расчета показателей надежности.
10. Определение среднего значения показателя надежности, среднего квадратического отклонения, коэффициента вариации.
11. Анализ и классификация информации об отказах.
12. Характеристика вредных процессов, приводящих к отказам машин.
13. Обеспечение надежности машин при проектировании.
14. Надежность сложных систем.
15. Поддержка надежности машин в процессе эксплуатации.
16. Методы повышения надежности при проектировании, производстве, эксплуатации и ремонте.
17. Технологические методы обеспечения надежности машин.
18. Структурные модели надежности сложных систем.
19. Сущность резервирования с нагруженным и ненагруженным резервом.
20. Схемы общего и отдельного резервирования сложной системы.
21. Основные планы испытаний на надежность.
22. Методика анализа и устранения причин отказов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание: Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М. : Радио и связь, 1988. – 392 с.
2. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 506 с.
3. Ветошкин, А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / А.Г. Ветошкин. – Пенза : ПГУАиС, 2003. – 154 с.
4. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
5. Гуськов, А.В. Надежность технических систем и техногенный риск / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2007. – 427 с.
6. Дружинин, Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г.В. Дружинин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
7. Калявин, В.П. Надежность и диагностика / В.П. Калявин. – СПб. : Элмор, 1998. – 230 с.
8. Надежность в машиностроении : справочник / под ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб. : Политехника, 1992. – 719 с.
9. Надежность технических систем : справочник / под ред. И.А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.
10. Оценка работоспособности объектов при постепенных отказах : метод. указания / сост. А.Б. Колобов, Ф.Б. Огурцов. – Иваново : Изд-во ИГЭУ, 1991. – 40 с.
11. Переездчиков, И.В. Надежность технических систем и техногенный риск : в 2 ч. Ч. 1. Управление риском системы «человек – машина – среда» / И.В. Переездчиков, О.В. Крышевич. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 47 с.
12. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 704 с.
13. Расчет показателей надежности по результатам экспериментов : метод. указания / сост. А.Б. Колобов. – Иваново : Изд-во ИГЭУ, 1998. – 36 с.

Дополнительная литература

14. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. — М. : Издательство стандартов, 1979. — 22 с.
15. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. — М. : Издательство стандартов, 1981. — 23 с.
16. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. — М. : Издательство стандартов, 1978. — 12 с.
17. ГОСТ 21623-76. Система технического обслуживания и ремонта техники. Показатели для оценки ремонтпригодности. — М. : Издательство стандартов, 1976. — 14 с.
18. ГОСТ 27.002-89. Надёжность техники. — М. : Издательство стандартов, 1989. — 24 с.
19. Регрессионный анализ результатов испытаний : методические указания / сост. А.Б. Колобов. — Иваново : Изд-во ИГЭУ. — 36 с.
20. Решетов, Д.Н. Надёжность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. — М. : Высш. шк., 1988. — 238 с.
21. Статистико-вероятностная оценка прочностной надёжности элементов механических систем : метод. указания / сост. А.Б. Колобов. — Иваново : Изд-во ИГЭУ. — 40 с.
22. Теория вероятностей в моделях расчёта надёжности и задачах диагностики технического состояния : метод. указания / сост. А.Б. Колобов. — Иваново : Изд-во ИГЭУ. — 40 с.
23. Ястребенецкий, М.А. Надёжность автоматизированных систем управления технологическими процессами / М.А. Ястребенецкий, Г.М. Иванова. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 264 с.

СОДЕРЖАНИЕ

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА	3
1. Цели и задачи дисциплины	3
2. Структура и объем дисциплины	5
3. Содержание дисциплины	6
4. Содержание практикума	9
5. Темы письменных работ(курсовых, рефератов, контрольных, расчетно-графических и др.)	11
6. Материально-техническое обеспечение дисциплины	11
7. Содержание самостоятельной работы	11
8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины	12
9. Требования к уровню освоения программы	12
М о д у л ь 1	
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНОГЕННОГО РИСКА	14
<u>Лабораторная работа 1</u> Исследование надежности технических систем с помощью элементов теории вероятности.....	15
М о д у л ь 2	
СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНОГЕННОГО РИСКА	30
<u>Лабораторная работа 2</u> Построение и расчет структурных схем надежности сложных систем	31
<u>Лабораторная работа 3</u> Исследование применения законов распределения отказов	43
<u>Лабораторная работа 4</u> Анализ показателей безопасности системы «человек – машина – среда»	53
М о д у л ь 3	
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	71
<u>Лабораторная работа 5</u> Расчет характеристик изделий восстанавливаемых и невосстанавливаемых технических систем	72
<u>Лабораторная работа 6</u> Оценка и контроль надежности технических устройств	79

<u>Лабораторная работа 7</u>	
Расчет количественных показателей надежности восстанавливаемых объектов	87
<u>Лабораторная работа 8</u>	
Расчет показателей надежности невосстанавливаемой системы с постоянными во времени интенсивностями отказов элементов	93
<u>Практическое занятие 1</u>	
Анализ надежности систем и их элементов по данным эксплуатации	102
Модуль 4	
ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК И ЕГО АНАЛИЗ	122
<u>Практическое занятие 2</u>	
Расчет надежности технических систем и их элементов по данным условий эксплуатации и конструкции изделий	123
<u>Практическое занятие 3</u>	
Определение техногенного риска системы	142
<u>Практическое занятие 4</u>	
Оценка техногенного риска системы	155
<u>Практическое занятие 5</u>	
Расчет количественных показателей надежности восстанавливаемых объектов методом марковских процессов	160
<u>Практическое занятие 6</u>	
Количественный анализ надежности технической системы	166
<u>Практическое занятие 7</u>	
Надежность систем при резервировании	192
<u>Практическое занятие 8</u>	
Логико-графический метод анализа надежности и риска технических систем	206
<u>Практическое занятие 9</u>	
Риск промышленных предприятий и его оценка	215
Ответы на тесты	227
Вопросы к экзамену	228
Темы для самостоятельной работы	231
Библиографический список	232

Учебное издание

*Кравцова Марианна Викторовна
Потчибий Наталья Сергеевна*

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК

Учебно-методическое пособие

Технический редактор *З.М. Малявина*
Корректор *Г.В. Данилова*
Компьютерная верстка: *И.И. Шишкина*
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 01.12.2011. Формат 60×84/16.
Печать оперативная. Усл. п. л. 13,72.
Тираж 200 экз. Заказ № 1-11-11.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14