

**Федеральное агентство по образованию  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГОУВП «АмГУ»**

**Инженерно-физический факультет**

**УТВЕРЖДАЮ**

**Зав. кафедрой БЖД**

\_\_\_\_\_ **А. Б. Булгаков**

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2007 г**

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

**Учебно-методический комплекс дисциплины**

для специальности 280101 “Безопасность жизнедеятельности в техносфере”

**Составитель: старший преподаватель Редозубов Р. Д.**

**Благовещенск 2007 г.**

Печатается по решению  
редакционно-издательского  
совета инженерно-  
физического факультета  
Амурского государственного  
университета.

Р.Д. Редозубов

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Надежность технических систем и техногенный риск» для студентов очной и заочной форм обучения по специальности 280101 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере». – Благовещенск. Амурский государственный университет, 2007.

Учебно-методические рекомендации ориентированы на оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения по специальности 280101 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере» для формирования знаний при изучении курса «Надежность технических систем и техногенный риск».

Амурский государственный университет, 2007.

## СОДЕРЖАНИЕ:

1. Рабочая программа дисциплины.	3
2. План-конспект лекций	17
3. Методическое указание к выполнению курсовой работы	23
4. Задания к курсовым работам	77
4. Вопросы к экзамену	86
5. Тестовые вопросы для проверки остаточных знаний	91

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию

ГОУВПО

«АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебно-научной работе

Е.С. Астапова

«\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

### РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине “Надежность технических систем и техногенный риск”  
(наименование дисциплины)

для специальности 280101, “Безопасность жизнедеятельности в техносфере”  
(шифр и наименование специальности)

Курс - 4 (дневная форма обучения)  
обучения)

Семестр 7 (дневная форма

Лекции - 36 (час.)

Экзамен - 7 сем.

Практические занятия - 36 (час.)

Зачет - нет

Лабораторные занятия - нет

Самостоятельная работа - 30 (час.)

Курсовая работа - 1

Всего часов 102 (час.)

Курс - 3 (заочная сокращенная ФО)  
ФО)

Семестр 5 (заочная сокращенная

Лекции - 6 (час.)

Экзамен - 5 сем.

Практические (семинарские) занятия - 4 (час.)

Зачет - нет

Лабораторные занятия - нет

Самостоятельная работа - 92 (час.)

Курсовая работа – 5

сем.

Всего часов - 102 (час.)

Составитель Р.Д. Редозубов, ст. преподаватель  
(И.О.Ф., должность, ученое звание)

Факультет инженерно-физический

Кафедра БЖД

2007 г.

Рабочая программа составлена на основании \_\_\_\_\_

(Государственного образовательного стандарта ВПО или типовой программы)

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры БЖД

«\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г., протокол № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

Рабочая программа одобрена на заседании УМС «БЖД в техносфере»  
(наименование специальности)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г., протокол № \_\_\_\_\_

Председатель \_\_\_\_\_  
(подпись, И.О.Ф.)

Рабочая программа переутверждена на заседании кафедры от \_\_\_\_\_  
протокол № \_\_\_\_\_ .

Зав.кафедрой \_\_\_\_\_  
подпись \_\_\_\_\_ Ф.И.О. \_\_\_\_\_

СОГЛАСОВАНО  
Начальник УМУ  
\_\_\_\_\_ Г.Н. Торопчина  
(подпись, И.О.Ф.)

СОГЛАСОВАНО  
Председатель УМС факультета  
\_\_\_\_\_ (подпись, И.О.Ф.)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

СОГЛАСОВАНО  
Заведующий выпускающей кафедрой

\_\_\_\_\_ (подпись, И.О.Ф.)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель преподавания дисциплины – сформировать у студентов знания об анализе и синтезе технических систем с заданным уровнем надежности и их диагностировании, анализе риска.

Задачами изучения дисциплины являются – освоение студентами методического подхода и процедур, необходимых для создания надежных технических (технологических) систем, знаний о структуре и составе систем их диагностики, навыков выбора и разработки последних.

В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- функциональные и числовые показатели надежности и ремонтпригодности технических элементов и систем;
- методы анализа (расчета) надежности техногенных систем;
- способы анализа технической эффективности сложных технических систем;
- методы диагностирования технических систем;

Уметь:

- определять по результатам испытаний и наблюдений оценки показателей надежности и ремонтпригодности технических элементов и систем;
- анализировать надежность локальных технических (технологических) систем;
- синтезировать локальные технические системы с заданным уровнем надежности;

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### **1. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МИНИМУМУ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

#### **ОПД.Ф.08. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Надежность как комплексное свойство технического объекта (прибора, устройства, машины, системы); сущность надежности как способности выполнять заданные функции, сохраняя свои основные характеристики в установленных пределах, при определенных условиях эксплуатации; безопасность, долговечность и сохраняемость как основные компоненты надежности; номенклатура основных источников аварий и катастроф; классификация аварий и катастроф; статистика аварий и катастроф; причины аварийности на производстве; прогнозирование аварий и катастроф; основы теории риска; анализ риска; нормативные значения риска; снижение опасности риска; аварийная подготовленность; аварийное реагирование; управление риском, допустимый риск.

### **2. ЛЕКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ -- (36 час.)**

#### **Раздел 1. Надежность технических систем – 26 час.**

1. Система и ее элементы – 2ч.
2. Надежность и качество функционирования ТС – 2ч.
3. Качественные показатели надежности и эффективности – 2ч.
4. Обзор фактов, влияющих на надежность. Резервирование в ТС – 2ч.
5. Контроль технического состояния объектов в процессе их эксплуатации. Влияние внешних факторов на надежность. Влияние обслуживания на надежность. – 1ч.

6. Случайные события. Порог случайных событий. Случайные величины и их характеристики. Замены распределения. Вероятностные процессы – 2ч.

7. Области расчетов надежности. Основы расчета надежности. Типовые случаи расчетов надежности. Требования к точности расчетов надежности – 2ч.

15. Значения и виды испытаний на надежность – 2 ч.

17. Содержание работ при моделировании. Основные понятия – 2ч.

18. Статическое моделирование надежности – 2ч.

19. Основные вопросы эксплуатационной надежности – 2ч.

20. Экономические вопросы надежности – 2ч.

21. Организационные вопросы обеспечения надежности – 2ч.

## **Раздел 2. Техногенный риск – 10 час.**

1. Основные источники аварий и катастроф. Классификация, статистика и прогнозирование аварий и катастроф – 2час.

2. Причины аварийности на производстве. Аварийная подготовленность. Аварийное реагирование – 2 час.

3. Основы теории риска. Понятие риска. Развитие риска на промышленных объектах – 2час.

4. Основы методологии анализа риска. Нормативные значения риска. Снижение опасности риска. Управление риском. Допустимый риск – 2час.

5. Моделирование риска. Принципы построения информационных технологий управления риском – 2час.

## **3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ (36 часов)**

### **Раздел 1. Надежность технических систем – 26 час.**

1. Количественные показатели надежности и эффективности – 4ч.

2. Случайные величины и их характеристики – 2ч.

3. Вероятностные процессы – 2ч.
4. Типовые случаи расчетов надежности – 4ч.
5. Расчет надежности изделий с учетом надежности программ – 4ч.
6. Расчет надежности с учетом глубины контроля – 4ч.
7. Синтез надежности технических систем – 4 ч.
7. Оценка точности моделирования надежности – 2ч.

## **Раздел 2. Техногенный риск – 10 час.**

1. Анализ и оценка риска. Количественные показатели риска – 4ч.
2. Системно-диагностический подход к оценке техногенного риска – 2 ч.
3. Моделирование риска – 2 ч.

## **4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА (30 часов)**

Самостоятельная работа студентов по дисциплине предусматривается в следующих формах:

- выполнение курсовой работы – 30 часов;
- выполнения практических заданий по темам практических занятий, подготовка отчетов по ним – 22 часа;

## **5. КУРСОВАЯ РАБОТА – (30 часов)**

Тема курсовой работы: «Расчет структурной надежности системы».

Методическое указание к курсовой работе:

Королев В. Л., Сугак Е. В. Расчеты структурной надежности систем.

Методическое указание и задания к курсовому проектированию по курсу «Надежность и испытания технических систем»/ Красноярский Государственный технический университет, 1997.

Курсовая работа состоит из двух частей:

- 1) Анализ надежности технической системы;

2) Повышение надежности системы до заданного уровня (синтез системы с требуемой надежностью).

Курсовая работа должна содержать пояснительную записку (25-30 страниц) и графическую часть (лист А3) в приложении.

Для получения допуска к защите курсовой работы необходимым и достаточным является выполнение студентом следующих требований:

- выполнены, сданы и проверены практические задания по темам занятий;
- предоставлена выполненная курсовая работа с подписями исполнителя, нормоконтроллера и руководителя («допущен к защите»).
- даны ответы на 2 вопроса по теоретическому курсу. Ответы должны содержать основные понятия и определения по темам курсовой работы и демонстрировать понимание материала.

Студент, не выполнивший поставленные требования, к защите не допускается.

Защита работы производится студентом индивидуально перед преподавателем и предусматривает доклад студента (не более 7 мин.) и ответы на вопросы. Критерии оценки курсовой работы на защите:

Оценка «удовлетворительно» ставится, если

- основные результаты работы, не являясь наилучшими из возможных, все же удовлетворяют предъявляемым требованиям;
- в результате доклада и ответов на вопросы выявлено понимание студентом основных положений теории, использованной при подготовке работы, однако ряд частных положений остался не проясненным.

Оценка «хорошо» ставится, если

- основные результаты работы близки к оптимальным, однако ответы на вопросы преподавателя выявили неполное понимание теоретических положений;

– ответы на вопросы выявили полное понимание теоретических положений, однако результаты работы, удовлетворяя в целом предъявляемым требованиям, далеки от оптимальных.

Оценка «отлично» ставится, если

- студентом получены результаты, близкие к оптимальным;
- в результате доклада и ответов на вопросы выявлено понимание студентом всех положений теории, использованной при подготовке работы.

## **6. ПЕРЕЧЕНЬ И ТЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ФОРМ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ**

Промежуточный контроль знаний студентов по дисциплине предусматривает две контрольные точки, оценки по которым выставляются на основе информации о выполнении практических заданий и курсовой работы. Предусмотрено тестирование по темам:

6.1. Единичные показатели надежности и восстанавливаемости.

Математическая взаимосвязь между ними – 1-я контрольная точка;

6.2. Синтез систем заданной надежности – 2-я контрольная точка;

## **7. ЭКЗАМЕН**

Экзамен предусматривает ответы на два теоретических вопроса и решение задачи.

Для допуска к экзамену основанием является выполнение, сдача, проверка и практических заданий по темам практических занятий и защита курсовой работы.

Для подготовки ответа студенту отводится 40 мин. Для получения удовлетворительной оценки достаточно показать знание основных понятий по теме вопроса. Оценка «хорошо» выставляется студенту, показавшему способность математического, технического и др. обоснований применяемых

решений и подходов по анализу и синтезу надежности автоматизированных систем, установок, процесса и т.д. Оценка «отлично» выставляется, если, кроме того, студент правильно ответил на дополнительные вопросы по темам, смежным с темами основных вопросов. При этом неправильные ответы на дополнительные вопросы могут служить основанием для снижения оценки до «удовлетворительно», если эти ответы свидетельствуют о слабом понимании материала.

#### ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Назовите характерные особенности ТС при анализе ее надежности.
2. Дайте определение основных понятий теории надежности.
3. Что такое надежность аппаратурная, программная, функциональная.
4. Что такое эффективность изделия. Укажите, какими показателями она измеряется.
5. Перечислите количественные показатели надежности.
6. Дать понятие математической теории надежности.
7. Дать понятие физической теории надежности.
8. Дать понятие статической теории надежности.
9. Требования к разработкам и исследованиям в области надежности.
10. Дать понятие надежности.
11. Дать понятие безотказности.
12. Дать понятие ремонтпригодности.
13. Дать понятие долговечности.
14. Дать понятие сохраняемости.
15. Дать понятие живучести.
16. Дать понятие отказа.
17. Дать понятие достоверности.
18. Виды отказов.
19. Виды эффективности.
20. Вероятность безотказной работы.
21. Вероятность отказа.

22. Интенсивность отказа.
23. Параметр потоков отказов восстанавливаемого объекта.
24. Средняя наработка до отказа.
25. Средняя наработка на отказ восстанавливаемого изделия.
26. Гамма процентная наработка до отказа.
27. Ресурс.
28. Срок службы.
29. Среднее время восстановления.
30. Назначенный срок хранения.
31. Коэффициент готовности.
32. Достоверность функционирования информационно-расчетного объекта.
33. Коэффициент оперативной готовности.
34. Коэффициент сохранения эффективности.
35. Направления совершенствования показателей надежности.
36. Основные факторы, влияющие на надежность ТС.
37. Способы рецензирования, используемые в ТС.
38. Виды контроля, используемого в ТС, и его влияние на надежность.
39. Климатические факторы, влиявшие на надежность ТС.
40. Роль и значение программного обеспечения в формировании показателей надежности ТС.
41. Основные средства обеспечения надежности ТС на этапе проектирования и эксплуатации.
42. Законы распределения, наиболее распространенные в теории надежности. Дать все и их особенности.
43. Свойства и условия возникновения экспоненциального и морального законов распределения.
44. Признаки и свойства простейшего потока отказов.
45. Сформулируйте понятие "вероятностный процесс" и приведите примеры вероятностных процессов в ТС.

46. Изложите порядок определения вероятности состояний стационарного «Марковского» процесса по заданным интенсивностям перехода.

47. Укажите преимущества и недостатки расчетных методов исследования надежности и области их применения.

48. Покажите связь между теорией расчетов надежности и математической логики, теории вероятностей и структурным анализом.

49. Укажите последовательность расчета надежности при использовании логического управления работоспособности.

50. Укажите последовательность расчета надежности при использовании

графа возможных состояний изделий.

51. Приведите примеры структурных преобразований при расчетах надежности.

52. Перечислите типовые случаи расчета надежности и укажите возможные варианты исходных данных для каждого из этих случаев.

53. Перечислите виды испытаний на надежность и дайте их краткую характеристику.

54. Укажите принципиальные особенности испытаний на надежности ТС.

55. Дайте порядок обработки результатов определительных испытаний.

56. Укажите назначение и виды контрольных испытаний на надежность.

57. Укажите направления дальнейшего совершенствования испытаний на надежность.

58. Перечислите основные работы, выполняемые при подготовке моделирования и при его проведении.

59. Сформулируйте основную идею, положенную в основу получения случайных чисел с помощью специальных подпрограмм.

60. Укажите способ воспроизведения переходов объекта в различные состояния.
61. Укажите ход процесса моделирования по укрупненному моделирующему алгоритму.
62. Укажите преимущества и недостатки моделирования как метода исследования надежности.
63. Перечислите назначения и виды профилактических работ.
64. Укажите контролируемые параметры и возможные способы их выбора.
65. Изложите правила определения сроков профилактики.
66. Определите число запасных элементов в ЗИП по заданным.
67. Укажите специфические особенности планирования ЗИП для ТС.
68. Основные источники аварий и катастроф.
69. Классификация, статистика и прогнозирование аварий и катастроф.
70. Причины аварийности на производстве.
71. Аварийная подготовленность. Аварийное реагирование
72. Основы теории риска. Понятие риска.
73. Развитие риска на промышленных объектах.
74. Основы методологии анализа риска.
75. Нормативные значения риска. Допустимый риск.
76. Снижение опасности риска. Управление риском.
77. Моделирование риска. Принципы построения информационных технологий управления риском.

# УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

## 1. Перечень обязательной (основной) литературы

1. Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М. и др. Надежность технических систем и техногенный риск. Учебное пособие для вузов. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002 – 368 с.

2. В.Л. Королев, Е.В. Сугак. Расчеты структурной надежности систем/ Методическое указание и задания к курсовому проектированию по курсу «Надежность и испытания технических систем»/ Красноярский Государственный технический университет, 1997.

## 2. Перечень дополнительной литературы

1. Т.А. Голинкевич. Прикладная теория надежности. -М.: изд. В.ш., 1985.

2. Г.Ц. Дружинин. Надежность устройств автоматики. -М.: Энергия, 1963.

3. Л.П. Глазунов и др. Основы теории надежности АСУ.-1984.

4. И.О. Атовмян и др. Надежность АСУ: 1979.

5. Балакирев З.С., Вадеников З.Я. Надежность технических и программных средств автоматики. Уч. пособие / АТИ.- 1994.

*Федеральное агентство по образованию Российской Федерации*  
*АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ*  
Инженерно-физический факультет

Р.Д. Редозубов

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**  
**ПЛАН-КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

**Благовещенск**  
**2007**

## ЛЕКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ -- (36 час.)

### Раздел 1. Надежность технических систем – 26 час.

#### *1.1. Система и ее элементы – 2ч.*

Основные понятия и определения теории надежности:

- надежность объекта, надежность технического объекта, работоспособность объекта, отказ объекта;
- основные задачи надежности – анализ, прогнозирование, расчет и оптимизация надежности, испытание объектов на надежность;
- классификация отказов – по степени нарушения работоспособности, по связи с отказами других объектов, по характеру проявления, по времени существования;
- рабочие режимы, авария, восстановление;
- относительность понятия «элемент и система» в теории надежности.

#### *1.2. Надежность и качество функционирования ТС – 2ч.*

- аспекты надежности как комплексного свойства – безотказность, долговечность, ремонтпригодность, устойчивоспособность, сохраняемость, управляемость, живучесть, безопасность;
- относительность понятия элемента и системы при расчете надежности. Факторы деления объекта на элемент и систему (схемный анализ, оперативное управление, конструктивное исполнение)

#### *1.3. Качественные показатели надежности и эффективности – 2ч.*

- единичные показатели надежности – показатели безотказности и показатели восстанавливаемости;
- показатели безотказности (вероятность безотказной работы, вероятность отказа, частота отказа, интенсивность отказа), их взаимосвязь;

- показатели восстанавливаемости (вероятность восстановления, вероятность не восстановления, частота восстановления, интенсивность восстановления, их взаимосвязь);
- комплексные показатели надежности (коэффициент готовности, коэффициент вынужденного простоя, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технического использования, средний недоотпуск продукции, средний ущерб на один отказ)

*1.4. Обзор фактов, влияющих на надежность. Резервирование в ТС – 2ч.*

- влияние надежности отдельных элементов на надежность системы;
- влияние структуры (не резервируемая, частично резервируемая, полностью резервируемая) системы на ее надежность.

*1.5. Контроль технического состояния объектов в процессе их эксплуатации. Влияние внешних факторов на надежность. Влияние обслуживания на надежность. – 2ч.*

- виды технического контроля;
- теоретические предпосылки, влияющие на периодичность технического контроля.

*1.6. Случайные события. Порог случайных событий. Случайные величины и их характеристики. Замены распределения. Вероятностные процессы – 2ч.*

- принципы построения программного обеспечения с точки зрения надежности;
- метод «упрощенной» программы.

*1.7. Области расчетов надежности. Основы расчета надежности. Типовые случаи расчетов надежности. Требования к точности расчетов надежности – 2ч.*

- расчет системы на вероятность безотказной работы;
- расчет системы на необходимый временной срок эксплуатации.

*1.8. Значения и виды испытаний на надежность – 2 ч.*

- роль испытаний на надежность при конструировании, изготовлении и эксплуатации;
- виды испытаний на надежность при конструировании, изготовлении и эксплуатации.

*1.9. Содержание работ при моделировании. Основные понятия – 2ч.*

Математическое определение необходимого количества элементов при синтезе надежности.

*1.10. Статическое моделирование надежности – 2ч.*

Использование ПП «Matcad» при анализе и синтезе надежности методом последовательного приближения.

*1.11. Основные вопросы эксплуатационной надежности – 2ч.*

- роль проведения ТО и ТР в процессе эксплуатации автоматизированных систем;
- повышение эксплуатационной надежности посредством создания автоматизированных систем с самодиагностикой;

*1.12. Экономические вопросы надежности – 2ч.*

- аспекты создания автоматизированных систем с требуемой надежностью относительно экономической эффективности;

- экономическая оценка эффективности модернизации системы с целью повышения надежности;
- критерии, не влияющие на экономические аспекты при реализации надежности системы.

### *1.13. Организационные вопросы обеспечения надежности – 2ч.*

- планирование ТО и ТР;
- техническая документация, необходимая для отражения проделанных ТО и ТР в процессе эксплуатации автоматизированных систем;
- техническая документация (формуляры), необходимая для отражения происшедших и устраненных отказов и поломок в процессе эксплуатации автоматизированных систем.

## **Раздел 2. Техногенный риск – 10 час.**

### *2.1. Природа и характеристика опасностей в техносфере – 2час.*

- техносфера, техника, техническая система;
- аксиомы о потенциальной опасности технических систем;
- таксономия опасностей;
- показатели безопасности технических систем.

### *2.2. Инженерные методы исследования безопасности технических систем – 2 час.*

- предварительный анализ опасностей;
- методы анализа опасностей и работоспособности;
- дерево отказов;
- дерево событий;
- дерево решений;
- таблицы состояний и аварийных сочетаний.

*2.3. Основы теории риска. Понятие риска. Развитие риска на промышленных объектах – 2час.*

- понятие риска;
- развитие риска на промышленных объектах;
- основы методологии анализа и управления риском;
- моделирование риска;
- принципы построения информационных технологий управления риском.

*2.4. Технические системы безопасности – 2час.*

- назначение и принципы работы технических систем;
- типовые структуры и принципы функционирования автоматических систем защиты;
- автоматическая интеллектуализированная система защиты объекта и управления уровнем безопасности;
- типовые локальные технические системы и средства безопасности.

*2.5. Правовые аспекты анализа риска и управления промышленной безопасностью – 2час.*

- декларация безопасности опасного промышленного объекта;
- требования к размещению промышленного предприятия;
- система лицензирования;
- экспертиза промышленной безопасности;
- государственный контроль и надзор за промышленной безопасностью;
- Российское законодательство в области промышленной безопасности.

*Федеральное агентство по образованию Российской Федерации*  
*АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ*  
Инженерно-физический факультет

Р.Д. Редозубов

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**  
**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ**  
**РАБОТЫ**

**Благовещенск**  
**2007**

## Предисловие

Данное методическое указание основано на следующем источнике

Королев В. Л., Сугак Е. В. Расчеты структурной надежности систем. Методические указания и задания к курсовому проектированию по курсу “Надежность и испытания МЭУ” для студентов направления 55.07.00. Красноярский государственный технический университет, Красноярск, 1997

КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## РАСЧЕТЫ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

Методические указания и задания к курсовому проектированию по курсу  
“Надежность и испытания МЭУ” для студентов направления 55.07.00

Составили: Королев В. Л., Сугак Е. В.

Красноярск, 1997

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Количественные характеристики безотказности
2. Структурно - логический анализ технических систем
3. Расчеты структурной надежности систем
  - 3.1. Системы с последовательным соединением элементов
  - 3.2. Системы с параллельным соединением элементов
  - 3.3. Системы типа “ $m$  из  $n$ ”
  - 3.4. Мостиковые системы
  - 3.5. Комбинированные системы
4. Повышение надежности технических систем
  - 4.1. Методы повышения надежности
  - 4.2. Расчет надежности систем с резервированием
5. Методические рекомендации
6. Пример расчета надежности

Приложение

Литература

## ВВЕДЕНИЕ

Надежностью называют свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. Расширение условий эксплуатации, повышение ответственности выполняемых техническими системами (ТС) функций, их усложнение приводит к повышению требований к надежности изделий.

Надежность является сложным свойством, и формируется такими составляющими, как безотказность, долговечность, восстанавливаемость и сохраняемость. Основным здесь является свойство безотказности - способность изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение времени. Потому наиболее важным в обеспечении надежности ТС является повышение их безотказности.

Особенностью проблемы надежности является ее связь со всеми этапами “жизненного цикла” ТС от зарождения идеи создания до списания: при расчете и проектировании изделия его надежность закладывается в проект, при изготовлении надежность обеспечивается, при эксплуатации - реализуется. Поэтому проблема надежности - комплексная проблема и решать ее необходимо на всех этапах и разными средствами. На этапе проектирования изделия определяется его структура, производится выбор или разработка элементной базы, поэтому здесь имеются наибольшие возможности обеспечения требуемого уровня надежности ТС. Основным методом решения этой задачи являются расчеты надежности (в первую очередь - безотказности), в зависимости от структуры объекта и характеристик его составляющих частей, с последующей необходимой коррекцией проекта. Некоторые способы расчета структурной надежности рассматриваются в данном пособии .

## 1. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Безотказность (и другие составляющие свойства надежности) ТС проявляется через случайные величины: наработку до очередного отказа и количество отказов за заданное время. Поэтому количественными характеристиками свойства здесь выступают вероятностные переменные.

*Наработка* есть продолжительность или объем работы объекта. Для ТС естественно исчисление наработки в единицах времени, тогда как для других технических средств могут быть удобнее иные средства измерения (например, наработка автомобиля - в километрах пробега). 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  $T$

$$M[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = T_0 \quad (1.1)$$

является характеристикой безотказности и называется *средней наработкой на отказ (между отказами)*. В (1.1) через  $t$  обозначено текущее значение наработки, а  $f(t)$  - плотность вероятности ее распределения.

*Вероятность безотказной работы* - вероятность того, что в пределах заданной наработки  $t$  отказ объекта не возникнет:

$$p(t) = \text{Вер}(T \geq t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (1.2)$$

Вероятность противоположного события называется *вероятностью отказа* и дополняет вероятность безотказной работы до единицы:

$$q(t) = \text{Вер}(T \leq t) = 1 - p(t) = F(t). \quad (1.3)$$

В (1.2) и (1.3)  $F(t)$  есть интегральная функция распределение случайной наработки  $t$ . Плотность вероятности  $f(t)$  также является показателем надежности, называемым *частотой отказов*:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d[1-p(t)]}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}. \quad (1.4)$$

Из (1.4) 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:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} = -\frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt}. \quad (1.5)$$

Функции  $f(t)$  и  $\lambda(t)$  измеряются в  $\text{ч}^{-1}$ .

Интегрируя (1.5), легко получить:

$$p(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]. \quad (1.6)$$

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  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$  (1.6) переходит в известное в теории вероятностей экспоненциальное распределение:

$$\left. \begin{aligned} p(t) &= \exp(-\lambda t); & F(t) &= 1 - \exp(-\lambda t); \\ f(t) &= \lambda \exp(-\lambda t) \end{aligned} \right\}. \quad (1.7)$$

Поток отказов при  $\lambda(t) = \text{const}$  называется *простейшим* и именно он реализуется для большинства РЭС в течении периода нормальной эксплуатации от окончания приработки до начала старения и износа.

Подставив выражение плотности вероятности  $f(t)$  экспоненциального распределения (1.7) в (1.1), получим:

$$T_0 = 1/\lambda, \quad (1.8)$$

т.е. при простейшем потоке отказов средняя наработка  $T_0$  обратна интенсивности отказов  $\lambda$ . С помощью (1.7) можно показать, что за время средней наработки,  $t = T_0$ , вероятность безотказной работы изделия составляет

1/е. Часто используют характеристику, называемую  $\gamma$  - *процентной наработкой* - время, в течении которого отказ не наступит с вероятностью  $\gamma$  (%):

$$T_\gamma = -\frac{\ln P_\gamma}{\lambda} = -T_0 \ln P_\gamma, P_\gamma = \frac{\gamma}{100}. \quad (1.9)$$

Выбор параметра для количественной оценки надежности определяется назначением, режимами работы изделия, удобством применения в расчетах на стадии проектирования.

## 2. СТРУКТУРНО - ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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 пред-варительного структурно - логического анализа системы.

Большинство технических объектов, в том числе РЭС, являются сложными системами, состоящими из отдельных узлов, деталей, агрегатов, устройств контроля, управления и т.д. *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. Например при анализе работоспособности технологической линии ее элементами могут считаться отдельные установки и станки, транспортные и загрузочные устройства и т.д.. В свою очередь станки и устройства также могут считаться техническими системами и при оценке их надежности должны быть

разделены на элементы - узлы, блоки, которые, в свою очередь - на детали и т.д..

При определении структуры ТС в первую очередь необходимо оценить влияние каждого элемента и его работоспособности на работоспособность системы в целом. С этой точки зрения целесообразно разделить все элементы на четыре группы:

1. Элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность системы (например, деформация кожуха, изменение окраски поверхности и т.п.).

2. Элементы, работоспособность которых за время эксплуатации практически не изменяется и вероятность безотказной работы близка к единице (корпусные детали, малонагруженные элементы с большим запасом прочности).

3. Элементы, ремонт или регулировка которых возможна при работе изделия или во время планового технического обслуживания (наладка или замена технологического инструмента оборудования, настройка частоты селективных цепей РЭС и т.д.).

4. Элементы, отказ которых сам по себе или в сочетании с отказами других элементов приводит к отказу системы.

Очевидно, при анализе надежности ТС имеет смысл, включать в рассмотрение только элементы последней группы.

Для расчетов параметров надежности удобно использовать *структурно - логические схемы надежности* ТС, которые графически отображают взаимосвязь элементов и их влияние на работоспособность системы в целом. Структурно - логическая схема представляет собой совокупность ранее выделенных элементов, соединенных друг с другом последовательно или параллельно. Критерием для определения вида соединения элементов (последовательного или параллельного) при построении схемы является влияние их отказа на работоспособность ТС.

*Последовательным* (с точки зрения надежности) считается соединение, при котором отказ любого элемента приводит к отказу всей системы (рис. 2.1).

*Параллельным* (с точки зрения надежности) считается соединение, при котором отказ любого элемента не приводит к отказу системы, пока не откажут все соединенные элементы (рис. 2.2).

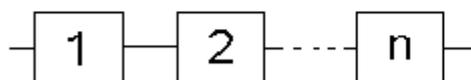


Рис. 2.1. Последовательное соединение элементов

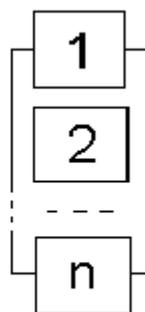


Рис. 2.2. Параллельное соединение элементов

Определенная аналогия здесь прослеживается с цепью, составленной из проводящих элементов (исправный элемент пропускает ток, отказавший, не пропускает): работоспособному состоянию ТС соответствует возможность протекания тока от входа до выхода цепи.

Примером последовательного соединения элементов структурно - логической схемы может быть технологическая линия, в которой происходит переработка сырья в готовый продукт, или РЭС, в котором последовательно осуществляется преобразование входного сигнала. Если же на некоторых участках линии, или пути сигнала, предусмотрена одновременная обработка на нескольких единицах оборудования, то такие элементы (единицы оборудования) могут считаться соединенными параллельно.

Однако не всегда структурная схема надежности аналогична конструктивной или электрической схеме расположения элементов. Например, подшипники на валу редуктора работают конструктивно параллельно друг с другом, однако выход из строя любого из них приводит к

отказу системы. Аналогично действие индуктивности и емкости параллельного колебательного контура в селективных каскадах РЭС. Указанные элементы с точки зрения надежности образуют последовательное соединение.

Кроме того, на структуру схемы надежности может оказывать влияние и вид возникающих отказов. Например, в электрических системах для повышения надежности в ряде случаев применяют параллельное или последовательное соединение коммутирующих элементов (рис. 2.3). Отказ таких изделий может происходить по двум причинам: обрыва (т.е. невозможности замыкания цепи) и замыкания (т.е. невозможности разрыва соединения). В случае отказа типа “обрыв” схема надежности соответствует электрической схеме системы (при “обрыве” любого коммутатора при последовательном их соединении возникает отказ, при параллельном - все функции управления будет выполнять исправный коммутатор). В случае отказа типа “замыкание” схема надежности противоположна электрической (в параллельном включении утратится возможность отключения тока, а в последовательном общего отказа не происходит).

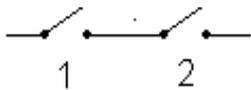
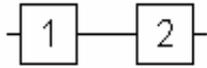
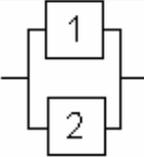
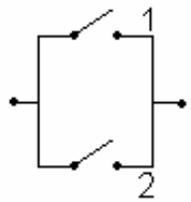
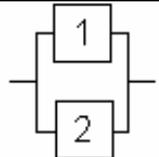
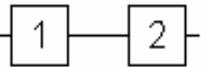
Электрическая схема	Структурная схема надежности при отказе типа	
	обрыв	замыкание
		
		

Рис. 2.3. Электрические и структурные схемы соединения коммутационных элементов при различных видах отказов

В целом 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 “безотказной работы” 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.

В зависимости от поставленной задачи на основании результатов расчета характеристик надежности ТС делаются выводы и принимаются решения о необходимости изменения или доработки элементной базы, резервировании отдельных элементов или узлов, об установлении определенного режима профилактического обслуживания, о номенклатуре и количестве запасных элементов для ремонта и т.д..

### 3. РАСЧЕТЫ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

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 возможен расчет безотказности любой ТС свести к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы.

Такой метод (*метод прямого перебора* - см. п. 3.3) практически универсален и может использоваться при расчете любых ТС. Однако при большом количестве элементов системы  $n$  такой путь становится нереальным из-за большого объема вычислений (например, при  $n=10$  число возможных состояний системы составляет,  $2^n = 1024$ , при  $n=20$  превышает , при  $n=30$  - более  $10^9$ ). Поэтому на практике используют более эффективные и экономичные методы расчета, не связанные с большим объемом вычислений. Возможность применения таких методов связана со структурой ТС.

### 3.1. Системы с последовательным соединением элементов

Системой с *последовательным соединением элементов* называется система, в которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы (см. п. 2, рис 2.1). Такое соединение элементов в технике встречается наиболее часто, поэтому его называют *основным соединением*.

В системе с последовательным соединением для безотказной работы в течении некоторой наработки  $t$  необходимо и достаточно, чтобы каждый из ее  $n$  элементов работал безотказно в течении этой наработки. Считая отказы элементов независимыми, вероятность одновременной безотказной работы  $n$  элементов определяется по теореме умножения вероятностей: вероятность совместного появления независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)) \quad (3.1)$$

(далее аргумент  $t$  в скобках, показывающий зависимость показателей надежности от времени, опускаем для сокращения записей формул). Соответственно, вероятность отказа такой ТС

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n p_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i). \quad (3.2)$$

Если система состоит из равно надежных элементов ( $p_i = p$ ), то

$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n. \quad (3.3)$$

Из формул (3.1) - (3.3) 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 (3.1) 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 (см. п. 1), наработки элементов и системы подчиняются экспоненциальному распределению (1.7) и на основании (3.1) можно записать

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\Lambda t), \quad (3.4)$$

где

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const} \quad (3.5)$$

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 (1.8) и (1.9) могут быть определены средняя и  $\gamma$  - процентная наработки.

Из (3.4) - (3.5) следует, что для системы из  $n$  равнонадёжных элементов ( $\lambda_i = \lambda$ )

$$\Lambda = n\lambda, \quad T_0 = \frac{T_{0i}}{n}, \quad (3.6)$$

т.е. интенсивность отказов в  $n$  раз больше, а средняя наработка в  $n$  раз меньше, чем у отдельного элемента.

### 3.2. Системы с параллельным соединением элементов

Системой с *параллельным соединением элементов* называется система, отказ которой происходит только в случае отказа всех ее элементов (см. п. 2, рис. 2.2). Такие схемы надежности характерны для ТС, в которых элементы дублируются или резервируются, т.е. параллельное соединение используется как метод повышения надежности (см. п. 4.2). 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:

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (3.7)$$

Соответственно, вероятность безотказной работы

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (3.8)$$

Для систем из равно надежных элементов ( $p_i = p$ )

$$Q = q^n, \quad P = 1 - (1 - p)^n, \quad (3.9)$$

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 (3.7) 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 (1.7) выражение (3.9) принимает вид

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n, \quad (3.10)$$

откуда с помощью (1.1) после интегрирования и преобразований средняя наработка системы определяется

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}, \quad (3.11)$$

где  $T_{0i} = 1/\lambda_i$  - средняя наработка элемента. При больших значениях  $n$  справедлива приближенная формула

$$T_0 = T_{0i} \left( \ln n + \frac{1}{2n} + 0.577 \right). \quad (3.12)$$

Таким образом, средняя наработка системы с параллельным соединением больше средней наработки ее элементов (например, при  $n = 2$   $T_0 = 1.5T_{0i}$ , при  $n = 3$   $T_0 = 1.83T_{0i}$ ).

### 3.3. 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 ( $m < n$ ).

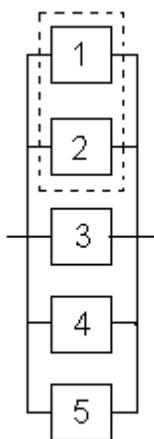


Рис. 3.1 Система “2 из 5”

На рис. 3.1 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 (см. п. 4.1, 4.2).

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. 3.1. (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

$$P_9 = p_1q_2p_3p_4q_5 = p^3q^2$$

(предполагается, что все элементы равно надежны). С учетом всех  
 возможных состояний вероятность безотказной работы системы может быть  
 найдена по теореме сложения вероятностей всех работоспособных  
 сочетаний. Поскольку в табл. 3.1 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”)

$$\begin{aligned} Q &= P_{32} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} = q^5 + 5pq^4 = \\ &= (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Тогда вероятность безотказной работы системы

$$P = 1 - q = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \quad (3.14)$$

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

$$P_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (3.15)$$

где  $C_n^k$  - биномиальный коэффициент, называемый “числом сочетаний  
 по k из n” (т.е. сколькими разными способами можно реализовать ситуацию  
 “k из n”):

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (3.16)$$

Значения биномиальных коэффициентов приведены в приложении.

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  $k = 0, 1, \dots (m-1)$ :

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} P_k = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (3.17)$$

Аналогичным образом можно найти вероятность безотказной работы как сумму (3.15) для  $k=m, m+1, \dots, n$ :

$$P = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (3.18)$$

Табл

ица 3.1

Таблица состояний системы “2 из 5”

N 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	-	-	-	-	-	-	$q^5 = (1-p)^5$

Очевидно, что  $Q+P=1$ , поэтому в расчетах следует выбирать ту из формул (3.17), (3.18), которая в данном конкретном случае содержит меньшее число слагаемых.

Для системы “2 из 5” (рис. 3.1) по формуле (3.18) получим:

$$P = C_5^2 p^2 (1-p)^3 + C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = 10p^2 (1-p)^3 + 10p^3 (1-p)^2 + 5p^4 (1-p) + p^5 = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \quad (3.19)$$

Вероятность отказа той же системы по (3.17):

$$Q = C_5^0 (1-p)^5 + C_5^1 p(1-p)^4 = (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5, \quad (3.20)$$

что, как видно, дает тот же результат для вероятности безотказной работы.

В табл. 3.2 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.

ица 3.2

Общее число элементов , n					
	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	-	-	-	-	$p^5$

### 3.4. Мостиковые схемы

*Мостиковая структура* (рис. 3.2, 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. 3.2, а, элементы 3 и 6 на рис. 3.2, 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. 3.2, 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.

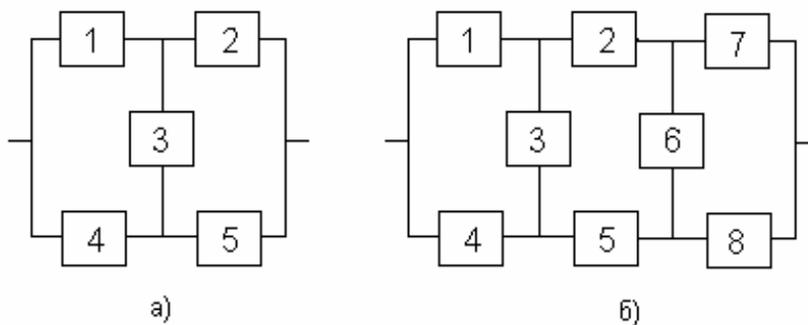


Рис.3.2. Мостиковые системы

ица 3.3

Табл

Таблица состояний мостиковой системы

N сост	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	+	+	+	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	
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	-	-	-	-	-	-	$q_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$q^5 = (1-p)^5$	

Для расчета надежности мостиковых систем можно воспользоваться *методом прямого перебора*, как это было сделано для систем “m из n” (п. 3.3), но при анализе работоспособности каждого состояния системы необходимо учитывать не только число отказавших элементов, но и их положение в схеме (табл. 3.3). Вероятность безотказной работы системы определяется как сумма вероятностей всех работоспособных состояний:

$$\begin{aligned}
 P = & p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 p_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 + \\
 & + q_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 q_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5.
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

В случае равно надежных элементов

$$P = p^5 + 5p^4 q + 8p^3 q^2 + 2p^2 q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2. \tag{3.22}$$

Метод прямого перебора эффективен только при малом количестве элементов  $n$ , о чем говорилось в начале разд. 3, поскольку число состояний

системы составляет  $2^n$ . Например, для схемы на рис. 3.2,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 надежности 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. 3.2,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. 2.1) имеет только один минимальный путь, включающий все элементы. В системе с параллельным соединением (рис. 2.2) число минимальных путей совпадает с числом элементов и каждый путь включает один из них.

Для мостиковой системы из пяти элементов (рис. 3.2,а) минимальных путей четыре: (элементы 1 и 4), (2 и 5), (1, 3 и 5), (2, 3 и 5). Логическая схема такой системы (рис. 3.3) составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального пути были соединены друг с другом последовательно, а все минимальные пути параллельно.

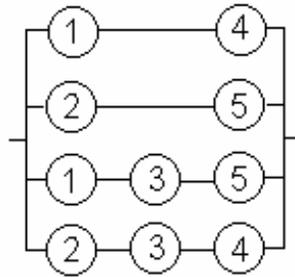


Рис.3.3 Логическая схема мостиковой системы по методу минимальных путей.

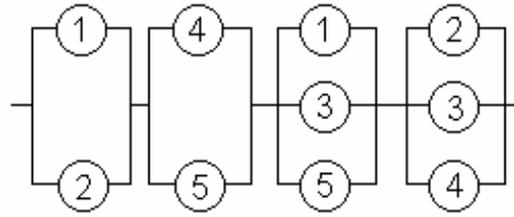


Рис.3.4 Логическая схема мостиковой системы по методу минимальных сечений.

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. 3.3 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. 3.3 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:

$$A = 1 - (1 - a_1a_4)(1 - a_2a_5)(1 - a_1a_3a_5)(1 - a_2a_3a_4). \quad (3.23)$$

В выражении (3.23) переменные  $a$  рассматриваются как булевы, т.е. могут приниматься только два значения: 0 или 1. Тогда при возведении в любую степень  $k$  любая переменная  $a$  сохраняет свое значение:  $a_i^k = a_i$ . На основе этого свойства функция алгебры логики (3.23) может быть преобразована к виду

$$A = a_1a_4 + a_2a_5 + a_1a_3a_5 + a_2a_3a_4 - a_1a_2a_3a_4 - a_1a_2a_3a_5 - 2a_1a_2a_4a_5 - a_2a_3a_4a_5 + 2a_1a_2a_3a_4a_5. \quad (3.24)$$

Заменив в выражении (3.24) символы событий  $a_i$  их вероятностями  $p_i$ , получим уравнение для определения вероятности безотказной работы системы

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - 2 p_1 p_2 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5. \quad (3.25)$$

Для системы равнонадёжных элементов ( $p_i = p$ ) выражение (3.25) легко преобразуется в формулу (3.22).

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.

В мостиковой системе (рис. 3.2, а) минимальных сечений четыре (элементы 1 и 2), (4 и 5), (1, 3 и 5), (2, 3 и 4). Логическая схема системы (рис.3.4) 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. 3.4 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. 3.4 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

$$A = [1 - (1 - a_1)(1 - a_2)][1 - (1 - a_4)(1 - a_5)] * [1 - (1 - a_1)(1 - a_3)(1 - a_5)] * [1 - (1 - a_2)(1 - a_3)(1 - a_4)]. \quad (3.26)$$

После преобразований с использованием свойств булевых переменных (3.26) приобретает форму (3.24), после замены событий их вероятностями переходит в выражение (3.25).

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 (3.22), 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*, основанными на известной в математической логике теореме о разложении функции логики по любому аргументу. Согласно ей, можно записать:

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0), \quad (3.27)$$

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. 3.2, а) в качестве особого элемента целесообразно выбрать диагональный элемент 3. При  $p_3 = 1$  мостиковая схема превращается в параллельно - последовательное соединение (рис. 3.5, а), а при  $p_3 = 0$  - в последовательно - параллельное (рис. 3.5, б).

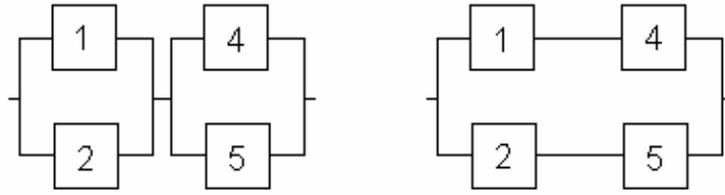


Рис.3.5. Преобразование мостиковой схемы при абсолютно надежном (а) и отказавшем (б) центральном элементе.

Для преобразованных схем можно записать:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)], \quad (3.28)$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5). \quad (3.29)$$

Тогда на основании формулы (3.27) получим:

$$P = p_3 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + (1 - p_3) [1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)]. \quad (3.30)$$

Легко убедиться, что для равно надёжных элементов формула (3.30) обращается в (3.22).

Этим методом можно воспользоваться и при разложении относительно нескольких “особых” элементов. Например, для двух элементов  $(i, j)$  выражение (3.27) примет вид:

$$P = p_i p_j P(p_i = 1, p_j = 1) + p_i q_j P(p_i = 1, p_j = 0) + q_i p_j P(p_i = 0, p_j = 1) + q_i q_j P(p_i = 0, p_j = 0). \quad (3.31)$$

Вероятность безотказной работы мостиковой схемы (рис. 3.2, б) при разложении относительно диагональных элементов 3 и 6 по (3.31) определится:

$$P = p_3 p_6 P(p_3 = 1, p_6 = 1) + p_3 q_6 P(p_3 = 1, p_6 = 0) + q_3 p_6 P(p_3 = 0, p_6 = 1) + q_3 q_6 P(p_3 = 0, p_6 = 0). \quad (3.32)$$

Вероятности  $P(p_3 p_6)$  легко ставить, выполнив предварительно преобразованные схемы, подобно рис. 3.5, а, б.

### 3.5. Комбинированные системы

Большинство реальных ТС имеет сложную *комбинированную структуру*, часть элементов которой образует последовательное соединение, другая часть - параллельное, отдельные ветви элементы или ветви структуры образуют мостиковые схемы или 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.

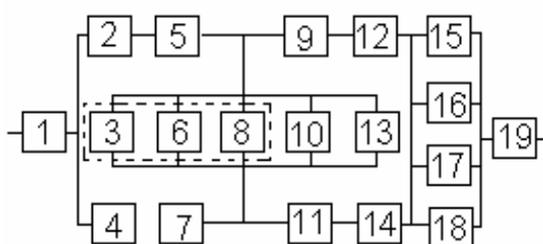


Рис.3.6 Исходная система

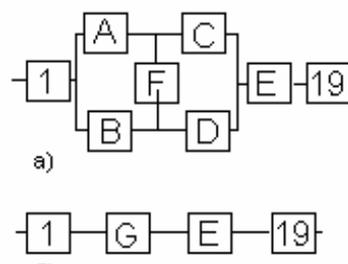


Рис.3.7 Преобразованные системы

В качестве примера рассмотрим комбинированную систему, представленную на рис. 3.6. Здесь элементы 2 и 5, 4 и 7, 9 и 12, 11 и 14 попарно образуют друг с другом последовательные соединения. Заменяем их соответственно квазиэлементами А, В, С, Д, для которых расчет надежности элементарно выполняется по формулам п. 3.1. Элементы 15, 16, 17 и 18 образуют параллельное соединение (п. 3.2), а элементы 3, 6, 8, 10 и 13 - систему “3 из 5” (п. 3.2). Соответствующие квазиэлементы обозначим Е и F. В результате преобразованная схема примет вид, показанный на рис. 3.7, а. В ней в свою очередь элементы А, В, С, Д, F образуют мостиковую схему (п. 3.4), которую заменяем квазиэлементом б. Схема, полученная после таких

преобразований (рис.3.7,б), образует последовательное соединение элементов 1, G, E, 19, для которых справедливы соотношения п. 3.1. Отметим, что метод прямого перебора для исходной системы потребовал бы рассмотреть  $2^{19} = 524288$  возможных состояний.

## 4. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 4.1. 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. Однако практическая реализация такой высокой надежности элементов может оказаться невозможной. Рассмотрение методов обеспечения надежности элементов ТС является предметом специальных технологических и физико-химических дисциплин и выходит за рамки теории надежности. Однако, в любом случае, высоконадежные элементы, как правило, имеют большие габариты, массу и стоимость. Исключение составляет использование более совершенной элементной базы, реализуемой на принципиально новых физических и технологических принципах (например, в РЭС - переход от дискретных элементов на интегральные схемы).

Изменение структуры системы с целью повышения надежности подразумевает два аспекта.

С одной 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*.

Принцип резервирования подобен рассмотренному ранее параллельному соединению элементов (п. 3.2) и соединению типа “n из m” (п. 3.3), где за счет избыточности возможно обеспечение более высокой надежности системы, чем ее элементов.

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.

Классификация различных способов структурного резервирования осуществляется по следующим признакам:

1) по схеме включения резерва:

- общее резервирование, при котором резервируется объект в целом;
- отдельное резервирование, при котором резервируются отдельные элементы или их группы;
- смешанное резервирование, при котором различные виды резервирования сочетаются в одном объекте;

2) по способу включения резерва:

- постоянное резервирование, без перестройки структуры объекта при возникновении отказа его элемента;

- динамическое резервирование, при котором при отказе элемента происходит перестройка структуры схемы. В свою очередь подразделяется на:

- а) резервирование замещением, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного;

- б) скользящее резервирование, при котором несколько основных элементов резервируется одним или несколькими резервными, каждый из которых может заменить любой основной (т.е. группы основных и резервных элементов идентичны).

3) по состоянию резерва:

- нагруженное резервирование, при котором резервные элементы (или один из них) находятся в режиме основного элемента;

- облегченное резервирование, при котором резервные элементы (по крайней мере один из них) находятся в менее нагруженном режиме по сравнению с основными;

- ненагруженное резервирование, при котором резервные элементы до начала выполнения ими функций находятся в ненагруженном режиме.

Основной характеристикой структурного резервирования является *кратность резервирования* - отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов, выраженное несокращаемой дробью (типа 2:3; 4:2 и т.д.). Резервирование одного основного элемента одним резервным (т.е. с кратностью 1:1) называется *дублированием*.

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

$$G_p = \frac{P'}{P} = \frac{p_1 p_2 \dots p_{k-1} [1 - (1 - p_k)^2] p_{k+1} \dots p_n}{p_1 p_2 \dots p_{k-1} p_k p_{k+1} \dots p_n} = \frac{1 - (1 - p_k)^2}{p_k} = 2 - p_k. \quad (4.1)$$

Из формулы (4.1) 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).

В общем случае при выборе элемента (или группы элементов) для повышения надежности или резервирования необходимо исходить из условия обеспечения при этом максимального эффекта. Например, для мостиковой схемы (рис. 3.2,а) из формулы (3.21) можно получить выражение для частных производных вероятности безотказной работы системы по вероятности безотказной работы каждого из элементов, которые для идентичных по надежности элементов принимают следующий вид:

$$\frac{dp}{dp_1} = \frac{dp}{dp_2} = \frac{dp}{dp_4} = \frac{dp}{dp_5} = pq^3 + 4p^2q^2 + p^3q, \quad (4.2)$$

$$\frac{dp}{dp_1} = 2p^2q^2. \quad (4.3)$$

Очевидно, максимальное увеличение надежности системы обеспечит увеличение надежности или резервирование того элемента, частная производная для которого при данных условиях принимает максимально положительное значение. Сравнение выражений (4.2) и (4.3) показывает, что при любых положительных значениях  $p$  и  $q$  выражение (4.2) больше выражения (4.3) и, следовательно, в мостиковой схеме с идентичными элементами эффективность повышения надежности или резервирования “периферийных” элементов 1, 2, 4 и 5 (см. рис. 3.2, а) выше, чем

диагонального элемента 3, если в качестве критерия эффективности взять вероятность безотказной работы.

Таким образом, наибольшее влияние на надежность системы оказывают элементы, обладающие высоким значением производной  $\frac{dp}{dp_i}$ , а при последовательном соединении - наименее надежные.

В более сложных случаях для выбора элементов, подлежащих изменению, используются как аналитические, так и численные методы оптимизации надежности.

#### 4.2. Расчет надежности систем с резервированием

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 смешенного 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 (п. 3.5). 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 (рис. 2.1) при общем резервировании с кратностью  $l$  (рис. 4.1, а)

$$P_{o\bar{o}} = 1 - (1 - P)^{l+1} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i\right)^{l+1}. \quad (4.4)$$

В частности, при дублировании ( $l=1$ )

$$P_{o\bar{o}} = 1 - (1 - P)^2 = P(2 - P). \quad (4.5)$$

При раздельном резервировании (рис. 4.1, б)

$$P_{paz} = \prod_{i=1}^n \left[1 - (1 - p_i)^{l+1}\right], \quad (4.6)$$

а при раздельном дублировании ( $l=1$ )

$$P_{paz} = \prod_{i=1}^n \left[1 - (1 - p_i)^2\right] = \prod_{i=1}^n p_i(2 - p_i) = p \prod_{i=1}^n (2 - p_i). \quad (4.7)$$

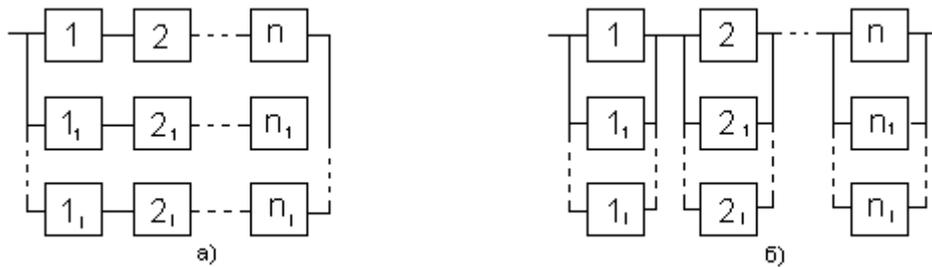


Рис. 4.1. Общее (а) и раздельное (б) нагруженное резервирование

Тогда коэффициенты выигрыша надежности по вероятности безотказной работы при дублировании

$$G_{o\bar{o}} = \frac{P_{o\bar{o}}}{P} = 2 - P, \quad G_{paz} = \frac{P_{paz}}{P} = \prod_{i=1}^n (2 - p_i), \quad (4.8)$$

откуда следует, что раздельное резервирование эффективнее общего (например, для системы из трех одинаковых элементов при  $p = 0.9$   $G_{o\bar{o}} = 1.27$ ,  $G_{paz} = 1.33$ ).

При *ненагруженном резервировании* резервные элементы последовательно включаются в работу при отказе основного, затем первого резервного и т.д. (рис. 4.2), поэтому надежность резервных элементов

зависит от момента их перехода в основное состояние. Такое резервирование в различных ТС встречается наиболее часто, т.к. оно по сути аналогично замене отказавших элементов и узлов на запасные.

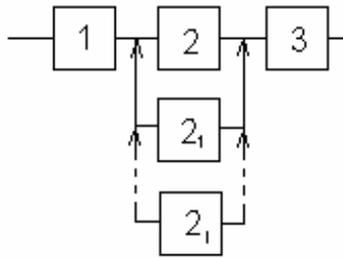


Рис.4.2. Ненагруженное резервирование

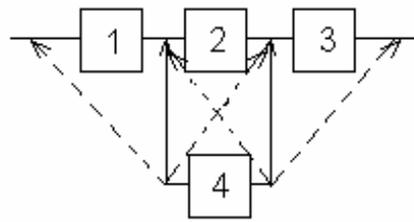


Рис.4.3. Скользящее резервирование

Если резервные элементы до их включения абсолютно надежны, то для системы с ненагруженным резервированием кратности  $l$  (всего элементов  $l+1$ )

$$Q = \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} q_i; \quad P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} (1 - p_i), \quad (4.9)$$

т.е. вероятность отказа в  $(l+1)!$  раз меньше, чем при нагруженном (параллельном соединении, см. формулу (3.7)).

Для идентичных по надежности основного и резервного элементов

$$P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} (1 - p)^{l+1}. \quad (4.10)$$

При экспоненциальном распределении наработки (простейшем потоке отказов, см. 1.7) в случае  $\lambda t \ll 1$  можно воспользоваться приближенной формулой

$$P \approx 1 - \frac{(\lambda t)^{l+1}}{(l+1)!}. \quad (4.11)$$

При ненагруженном резервировании средняя наработка на отказ

$$T = \sum_{i=1}^{l+1} T_{0i}, \quad (4.12)$$

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

$$P = \frac{1}{(l+1)!} \lambda (\lambda + \lambda_0)(\lambda + 2\lambda_0) \dots [\lambda + l\lambda_0] \cdot t^{l+1} =$$

$$= \frac{t^{l+1}}{(l+1)!} \prod_{i=0}^l (\lambda + i\lambda_0), \quad (4.13)$$

где  $\lambda_0$  - интенсивность отказов элементов в облегченном режиме,  $l$  - кратность резервирования.

*Скольльзящее резервирование* используется для резервирования нескольких одинаковых элементов системы одним или несколькими одинаковыми резервными (рис. 4.3, 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 скольльзящим резервированием аналогичен расчету систем типа “m из n”, см. п. 3.3.

## 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Задание на курсовую работу (КР) содержит в качестве исходных данных структурную схему надежности технической системы (ТС) и интенсивность отказов ее элементов (см. п. 7). То есть студент оказывается в ситуации, когда выполнены п. 1 - 6 анализа структурной надежности ТС (см. разд. 2), и ему надлежит в первую очередь выполнить п. 7 - составить расчетные зависимости для определения показателей надежности системы

для различных значений наработки  $t$ , чтобы графически изобразить вероятность безотказной работы  $P(t)$  как функцию наработки.

Поскольку заданная схема надежности является комбинированной, ее следует подвергнуть декомпозиции, как это описано в п. 3.5. Далее, вводя соответствующие квазиэлементы, преобразовать исходную схему к простейшему виду и, используя соответствующие формулы п. 3.1 - 3.4, для ряда значений наработки  $t$  в предположении простейшего потока отказов формулы (1.7) вычислить значения вероятностей безотказной работы элементов, квазиэлементов и всей системы. В пояснительной записке следует привести все промежуточные преобразования исходной схемы, конкретные рабочие расчетные формулы с их обоснованием, а результаты расчета представить в виде таблицы, в которой по столбцам изменяется значение наработки  $t$ , а по строкам в столбцах приводятся вычисленные значения вероятностей безотказной работы элементов, квазиэлементов и всей системы, полученные по рабочим формулам. При этом диапазон измерения наработки  $t$  должен обеспечить снижение вероятности безотказной работы системы до уровня 0.1 - 0.2 и содержать не менее 8-10 значений аргумента.

После этого строится график зависимости  $P(t)$  по результатам расчета. И него графически по заданному значению  $\gamma(P_\gamma)$  определяется  $\gamma$  - процентная наработка системы (см. (1.9)),  $T_\gamma$ .

По заданию требуется предложить способы увеличения  $\gamma$  - процентной наработки в 1.5 раза за счет повышения надежности элементов и за счет структурного резервирования.

Предварительно следует определить элемент или квазиэлемент окончательно преобразованной схемы, повышение надежности которого даст максимальный эффект в отношении надежности всей системы. Критерии выбора приведены в п. 4.1. Поскольку аналитически определить производные вида (4.2), (4.3) обычно не удастся, выбор элемента может быть осуществлен по величине вероятности безотказной работы.

Для дальнейших действий необходимо вычислить требуемое улучшенное значение  $\gamma$  - процентной наработки  $T'_\gamma$  элементарным умножением  $T_\gamma$  на 1.5. Следовательно, чтобы удовлетворить заданию в отношении повышения надежности системы, необходимо обеспечить вероятность безотказной работы  $P = P_\gamma$  за время  $t = T'_\gamma = T_\gamma 1.5$ . Теперь следует повторить расчет надежности элементов, квазиэлементов и всей системы за время  $T'_\gamma$  и дополнить этим столбцом предыдущую таблицу. Зная вероятности безотказной работы всех элементов преобразованной схемы и требуемое значение  $P_\gamma$ , легко определить, какую вероятность безотказной работы  $P'$  за время  $T'_\gamma$  должен иметь квазиэлемент, избранный для модернизации.

По первому варианту модернизации необходимо определить интенсивности отказов элементов, входящих в данный квазиэлемент, при которых при неизменной структуре квазиэлемента обеспечивалось бы необходимое значение  $p'(T'_\gamma)$ . Проще это осуществить графоаналитическим методом, задавая ряд пропорционально уменьшенных (по сравнению с исходной) интенсивностей отказов для составляющих квазиэлемента и просчитывая каждый раз величину  $p'(T'_\gamma)$ . Из построенного по этим данным графика можно определить необходимую кратность снижения интенсивности отказов элементов и сами значения интенсивности. Для найденного решения следует выполнить проверочный расчет вероятности безотказной работы системы за время  $T'_\gamma$ .

По второму методу надежность выбранного квазиэлемента можно повысить за счет резервирования без изменения надежности составляющих элементов. При этом, основываясь на рекомендациях и соображениях, изложенных в п. 4.1, 4.2, учитывая структуру модернизируемого квазиэлемента, нужно выбрать, какие его составляющие элементы и как следует резервировать для достижения наибольшего эффекта. Далее остается определить необходимую кратность резервирования  $\ell$ . Поскольку  $\ell$  есть

величина дискретная, аналитически ее определить невозможно. Для решения задачи нужно последовательно увеличивать кратность резервирования, начиная с единицы, каждый раз по соответствующим формулам из п. 4.2 определять величину вероятности безотказной работы квазиэлемента в течении времени  $T'_\gamma$ . Как только необходимое значение  $p'(T'_\gamma)$  будет обеспечено, окажется реализованным второй метод повышения надежности системы. Для найденного решения также необходимо провести проверку вероятности безотказной работы системы за время  $T'_\gamma$ . Модернизированную структуру с резервированием следует привести в пояснительной записке.

Для построения зависимостей вероятностей безотказной работы от времени для модернизированной системы по первому и второму методу удобно дополнить ранее составленную таблицу соответствующими строками. Графики этих зависимостей следует изобразить совместно с кривой  $P(t)$  исходной системы.

Полученное семейство кривых позволяет провести сравнение двух вариантов модернизации, которое следует привести в качестве вывода к работе.

Пояснительная записка должна быть оформлена в соответствии с СТП КрПИ 3.1 - 92 "Текстовые документы. Требования к оформлению". Все действия и использование расчетных соотношений должны быть объяснены и обоснованы. Для заимствуемой информации (формулы, численные значения констант) необходимо указать источник заимствования.

Задания на курсовую работу приведены в разд. 6, а в разд. 7 - пример расчета надежности.

## 7. ПРИМЕР РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Структурная схема надежности приведена на рис 7.1. Значения интенсивности отказов элементов даны в  $10^{-6}$  1/ч.

$$\lambda_i = \lambda$$

1. В исходной схеме элементы 2 и 3 образуют параллельное соединение. Заменяем их квазиэлементом А. Учитывая, что  $\lambda_i = \frac{f(i)}{f(i)} = \frac{1 \cdot f(i)}{f(i) \cdot 1}$ , получим

$$p_A = 1 - q_2 q_3 = 1 - q_2^2 = 1 - (1 - p_2)^2. \quad (7.1)$$

2. Элементы 4 и 5 также образуют параллельное соединение, заменив которое элементом В и учитывая, что  $p_4 = p_5 = p_2$ , получим

$$p_B = 1 - q_4 q_5 = 1 - q_2^2 = p_A. \quad (7.2)$$

3. Элементы 6 и 7 в исходной схеме соединены последовательно. Заменяем их элементом С, для которого при  $p_6 = p_7$

$$p_C = p_6 p_7 = p_6^2. \quad (7.3)$$

4. Элементы 8 и 9 образуют параллельное соединение. Заменяем их элементом D, для которого при  $p_8 = p_9$ , получим

$$p_D = 1 - q_8 q_9 = 1 - q_8^2 = 1 - (1 - p_8)^2. \quad (7.4)$$

5. Элементы 10 и 11 с параллельным соединением заменяем элементом Е, причем, так как  $p_{10} = p_{11} = p_8$ , то

$$p_E = 1 - q_{10} q_{11} = 1 - q_{10}^2 = 1 - (1 - p_{10})^2 = p_D \quad (7.5)$$

6. Элементы 12, 13, 14 и 15 образуют соединение “2 из 4”, которое заменяем элементом F. Так как  $p_{12} = p_{13} = p_{14} = p_{15}$ , то для определения вероятности безотказной работы элемента F можно воспользоваться комбинаторным методом (см. раздел 3.3):

$$\begin{aligned} p_E &= \sum_{k=2}^4 p_k = \sum_{k=2}^4 C_4^k p_{12}^k (1 - p_{12})^{4-k} = \\ &= \frac{4!}{2!2!} p_{12}^2 (1 - p_{12})^2 + \frac{4!}{3!1!} p_{12}^3 (1 - p_{12}) + \frac{4!}{4!0!} p_{12}^4 = \\ &= 6p_{12}^2 (1 - p_{12})^2 + 4p_{12}^3 (1 - p_{12}) + p_{12}^4 = 6p_{12}^2 - 8p_{12}^3 + 3p_{12}^4. \end{aligned} \quad (7.6)$$

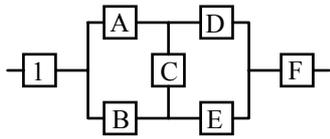


Рис.7.2. Преобразованная схема

7. Преобразованная схема изображена на рис. 7.2.

8.

Элементы A, B, C, D и E образуют (рис. 7.2) мостиковую систему, которую можно заменить квазиэлементом G. Для расчета вероятности безотказной работы воспользуемся методом разложения относительно особого элемента (см. раздел 3.4), в качестве которого выберем элемент C. Тогда

$$p_G = p_C p_G(p_C = 1) + q_C p_C(p_C = 0), \quad (7.7)$$

где  $p_G(p_C = 1)$  - вероятность безотказной работы мостиковой схемы при абсолютно надежном элементе C (рис. 7.3, а),  $p_G(p_C = 0)$  - вероятность безотказной работы мостиковой схемы при отказавшем элементе C (рис. 7.3, б).

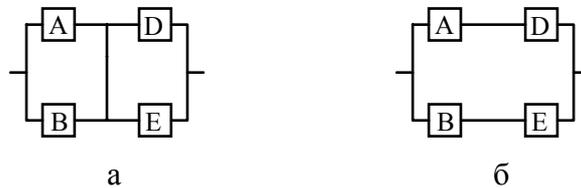


Рис.7.3. Преобразования мостиковой схемы при абсолютно надежном (а) и отказавшем (б) элементе C.

Учитывая, что  $p_B = p_A$ , получим

$$\begin{aligned}
p_G &= p_C [1 - (1 - p_A)(1 - p_B)] \cdot [1 - (1 - p_D)(1 - p_E)] + \\
&+ (1 + p_C) [1 - (1 - p_A p_B)(1 - p_D p_E)] = \\
&= p_C [1 - (1 - p_A)^2] \cdot [1 - (1 - p_D)^2] + (1 - p_C) [1 - (1 - p_A^2)(1 - p_D^2)] = \\
&= p_C (2p_A - p_A^2)(2p_D - p_D^2) + (1 - p_C)(p_A^2 + p_D^2 - p_A^2 p_D^2) = \\
&= p_A p_C p_D (2 - p_A)(2 - p_D) + (1 - p_C)(p_A^2 + p_D^2 - p_A^2 p_D^2).
\end{aligned} \tag{7.8}$$

9. После преобразований схема изображена на рис. 7.4.



Рис.7.4. Преобразованная схема

10. В преобразованной схеме (рис. 7.4) элементы 1, G и F образуют последовательное соединение. Тогда вероятность безотказной работы всей

системы

$$P = p_1 p_G p_F. \tag{7.9}$$

11. Так как по условию все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации, то вероятность безотказной работы элементов с 1 по 15 (рис. 7.1) подчиняются экспоненциальному закону:

$$p_i = \exp(-\lambda_i t). \tag{7.10}$$

12. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы элементов 1 - 15 исходной схемы по формуле (7.10) для наработки до  $3 \cdot 10^6$  часов представлены в таблице 7.1.

13. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы квазиэлементов A, B, C, D, E, F и G по формулам (7.1) - (7.6) и (7.8) также представлены в таблице 7.1.

14. На рис. 7.5 представлен график зависимости вероятности безотказной работы системы P от времени (наработки) t.

15. По графику (рис. 7.5, кривая P) находим для  $\gamma = 50\%$  ( $P_\gamma = 0.5$ )  $\gamma$  - процентную наработку системы  $T_\gamma = 1.9 \cdot 10^6$  ч.

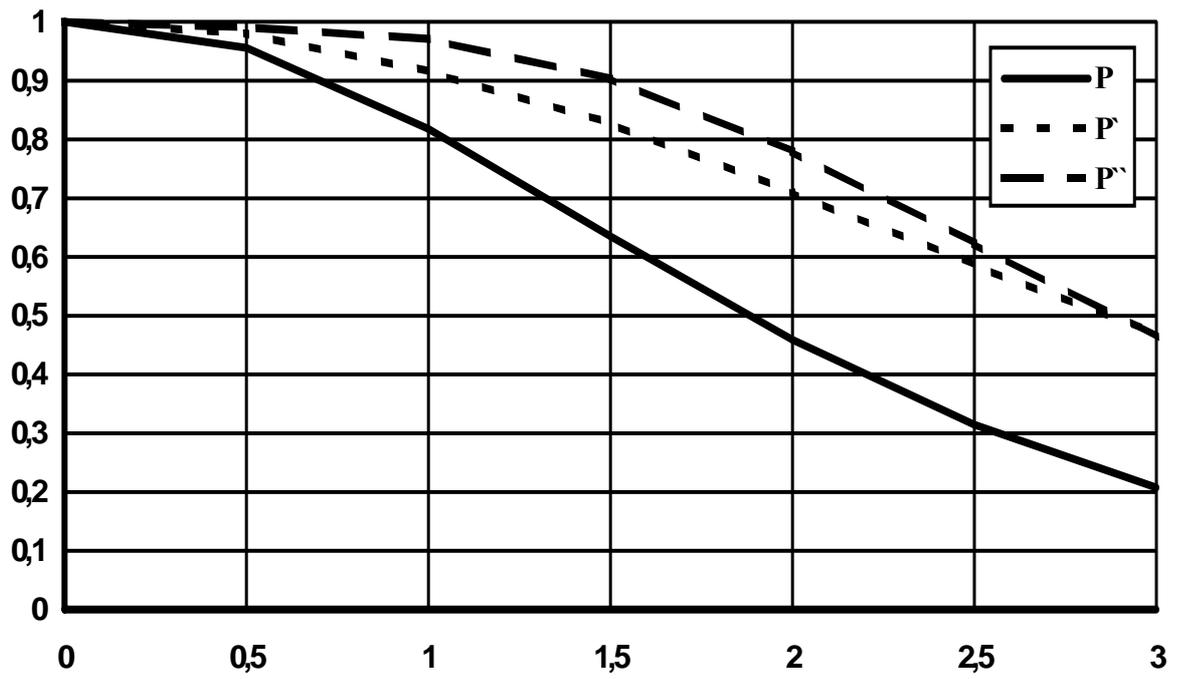
16. Проверочный расчет при  $t = 1.9 \cdot 10^6$  ч показывает (таблица 7.1), что  $P_\gamma = 0.4923 \approx 0.5$ .

17. По условиям задания повышенная  $\gamma$  - процентная наработка системы  $T'_\gamma = 1.5 \cdot T_\gamma = 1.5 \cdot 1.9 \cdot 10^6 = 2.85 \cdot 10^6$  ч.

ца 7.1

## Расчет вероятности безотказной работы системы

Элемент	$\lambda_i$ , $\times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Наработка $t$ , $\times 10^6$ ч							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,9	2,85
1	0,001	0,9995	0,9990	0,9985	0,9980	0,9975	0,9970	0,9981	0,9972
2 - 5	0,1	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408	0,8270	0,7520
6,7	0,01	0,9950	0,9900	0,9851	0,9802	0,9753	0,9704	0,9812	0,9719
8 - 11	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,6839	0,5655
12 - 15	0,5	0,7788	0,6065	0,4724	0,3679	0,2865	0,2231	0,3867	0,2405
A, B	-	0,9976	0,9909	0,9806	0,9671	0,9511	0,9328	0,9701	0,9385
C	-	0,9900	0,9801	0,9704	0,9608	0,9512	0,9417	0,9628	0,9446
D, E	-	0,9909	0,9671	0,9328	0,8913	0,8452	0,7964	0,9001	0,8112
F	-	0,9639	0,8282	0,6450	0,4687	0,3245	0,2172	0,5017	0,2458
G	-	0,9924	0,9888	0,9863	0,9820	0,9732	0,9583	0,9832	0,9594
P	-	0,9561	0,8181	0,6352	0,4593	0,3150	0,2075	0,4923	0,2352
12` - 15`	0,322	0,8513	0,7143	0,6169	0,5252	0,4471	0,3806	0,5424	0,3994
F`	-	0,9883	0,9270	0,8397	0,7243	0,6043	0,4910	0,7483	0,5238
P`	-	0,9803	0,9157	0,8270	0,7098	0,5866	0,4691	0,7343	0,5011
16 - 18	0,5	0,7788	0,6065	0,4724	0,3679	0,2865	0,2231	0,3867	0,2405
F``	-	0,9993	0,9828	0,9173	0,7954	0,6413	0,4858	0,8233	0,5311
P``	-	0,9912	0,9708	0,9034	0,7795	0,6226	0,4641	0,8079	0,5081



P

Рис 7.5. Изменение вероятности безотказной работы исходной системы (P), системы с повышенной надежностью (P') и системы со структурным резервированием элементов (P'').

t, x 10<sup>6</sup>ч

18. Расчет показывает (таблица 7.1), что при  $t = 2.85 \cdot 10^6$  ч для элементов преобразованной схемы (рис. 7.4)  $p_1 = 0.9972$ ,  $p_G = 0.9594$  и  $p_F = 0.2458$ . Следовательно, из трех последовательно соединенных элементов минимальное значение вероятности безотказной работы имеет элемент F (система “2 из 4” в исходной схеме (рис. 7.1)) и именно увеличение его надежности даст максимальное увеличение надежности системы в целом.

19. Для того, чтобы при  $T_\gamma' = 2.85 \cdot 10^6$  ч система в целом имела вероятность безотказной работы  $P_\gamma = 0.5$ , необходимо, чтобы элемент F имел вероятность безотказной работы (см. формулу (7.9))

$$p_F = \frac{p_\gamma}{p_1 p_G} = \frac{0.5}{0.9972 \cdot 0.9594} = 0.5226. \quad (7.11)$$

При этом значении элемент F останется самым ненадежным в схеме (рис. 7.4) и рассуждения в п.18 останутся верными.

Очевидно, значение  $p_F$ , полученное по формуле (7.11), является минимальным для выполнения условия увеличения наработки не менее, чем в 1.5 раза, при более высоких значениях  $p_F$  увеличение надежности системы будет большим.

20. Для определения минимально необходимой вероятности безотказной работы элементов 12 - 15 (рис. 7.1) необходимо решить уравнение (7.6) относительно  $p_{12}$  при  $p_F = 0.5226$ . Однако, т.к. аналитическое выражение этого уравнения связано с определенными трудностями, более целесообразно использовать графо-аналитический метод. Для этого по данным табл. 7.1 строим график зависимости  $p_F = f(p_{12})$ . График представлен на рис. 7.6.

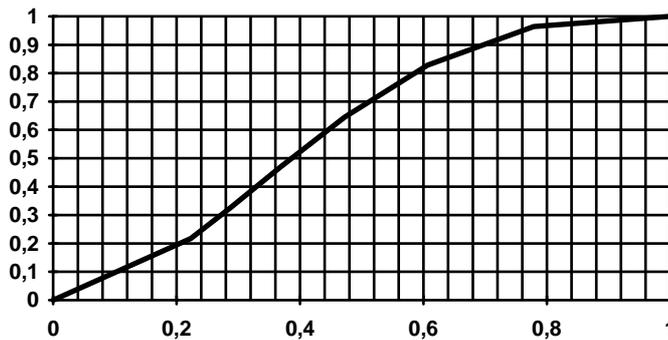


Рис. 7.6. Зависимость вероятности безотказной работы системы “2 из 4” от вероятности безотказной работы ее элементов.

21. По графику при  $p_F = 0.5226$  находим  $p_{12} \approx 0.4$ .

22. Так как по условиям задания все элементы работают в периоде нормальной эксплуатации и подчиняются экспоненциальному закону (7.10), то для элементов 12 - 15 при  $t = 2.85 \cdot 10^6$  находим

$$\lambda'_{12} = \lambda'_{13} = \lambda'_{14} = \lambda'_{15} = -\frac{\ln p_{12}}{t} = -\frac{\ln 0.4}{2.85 \cdot 10^6} = 0.322 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}. \quad (7.12)$$

$P_F$

23. Таким образом, для увеличения  $\gamma$  - процентной наработки системы необходимо увеличить надежность элементов 12, 13, 14 и 15 и снизить интенсивность их отказов с 0.5 до  $0.322 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ , т.е. в 1.55 раза.

24. Результаты расчетов для системы с увеличенной надежностью элементов 12, 13, 14 и 15 приведены в таблице 7.1. Там же приведены расчетные значения вероятности безотказной работы системы “2 из 4”  $F'$  и системы в целом  $P'$ . При  $t = 2.85 \cdot 10^6 \text{ ч}$  вероятность безотказной работы системы  $P' = 0.5011 \approx 0.5$ , что соответствует условиям задания. График приведен на рис 7.5.

25. Для второго способа увеличения вероятности безотказной работы системы - структурного резервирования - по тем же соображениям (см. п. 18) также выбираем элемент  $F$ , вероятность безотказной работы которого после резервирования должна быть не ниже  $p''_F = 0.5226$  (см. формулу ( 7.11 )).

26. Для элемента F - системы “2 из 4” - резервирование означает увеличение общего числа элементов. Аналитически определить минимально необходимое количество элементов невозможно, т.к. число элементов должно быть целым и функция  $p_F = f(n)$  дискретна.

27. Для повышения надежности системы “2 из 4” добавляем к ней элементы, идентичные по надежности исходным элементам 12 - 15, до тех пор, пока вероятность безотказной работы квазиэлемента F не достигнет заданного значения.

Для расчета воспользуемся комбинаторным методом (см. раздел 3.3) :

- добавляем элемент 16, получаем систему “2 из 5”:

$$q_F = \sum_{k=0}^1 C_5^k p_{12}^k (1-p_{12})^{5-k} = C_5^0 (1-p_{12})^5 + C_5^1 p_{12} (1-p_{12})^4 =$$

$$= (1-p_{12})^5 + 5p_{12}(1-p_{12})^4 = 0.6528, \quad (7.13)$$

$$p_F = 1 - q_F = 1 - 0.6528 = 0.3472 < 0.5226; \quad (7.14)$$

- добавляем элемент 17, получаем систему “2 из 6”:

$$q_F = \sum_{k=0}^1 C_6^k p_{12}^k (1-p_{12})^{6-k} = C_6^0 (1-p_{12})^6 + C_6^1 p_{12} (1-p_{12})^5 =$$

$$= (1-p_{12})^6 + 6p_{12}(1-p_{12})^5 = 0.5566, \quad (7.15)$$

$$p_F = 1 - q_F = 1 - 0.5566 = 0.4434 < 0.5226; \quad (7.16)$$

- добавляем элемент 18, получаем систему “2 из 7”:

$$q_F = \sum_{k=0}^1 C_7^k p_{12}^k (1-p_{12})^{7-k} = C_7^0 (1-p_{12})^7 + C_7^1 p_{12} (1-p_{12})^6 =$$

$$= (1-p_{12})^7 + 7p_{12}(1-p_{12})^6 = 0.4689, \quad (7.17)$$

$$p_F = 1 - q_F = 1 - 0.4689 = 0.5311 > 0.5226; \quad (7.18)$$

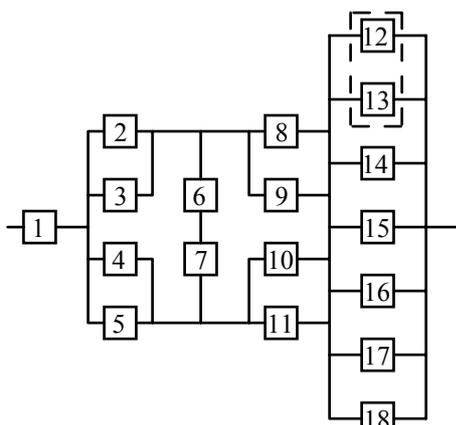


Рис.7.7. Структурная схема системы после структурного резервирования

28. Таким образом, для повышения надежности до требуемого уровня необходимо в исходной схеме (рис. 7.1) систему “2 из 4” достроить элементами 16, 17 и 18 до системы “2 из 7” (рис. 7.7).

29. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы

системы “2 из 7”  $F''$  и системы в целом  $P''$  представлены в таблице 7.1.

30. Расчеты показывают, что при  $t = 2.85 \cdot 10^6$  ч  $P'' = 0.5081 > 0.5$ , что соответствует условию задания.

31. На рис. 7.5 нанесены кривые зависимостей вероятности безотказной работы системы после повышения надежности элементов 12 - 15 (кривая  $P'$ ) и после структурного резервирования (кривая  $P''$ ).

Выводы:

1. На рис. 7.5 представлена зависимость вероятности безотказной работы системы (кривая  $P$ ). Из графика видно, что 50% - наработка исходной системы составляет  $1.9 \cdot 10^6$  часов.

2. Для повышения надежности и увеличения 50% - наработки системы в 1.5 раза (до  $2.85 \cdot 10^6$  часов) предложены два способа:

а) повышение надежности элементов 12, 13, 14 и 15 и уменьшение их отказов с 0.5 до  $0.322 \cdot 10^{-6}$  ч<sup>-1</sup>;

б) нагруженное резервирование основных элементов 12, 13, 14 и 15 идентичными по надежности резервными элементами 16, 17 и 18 (рис. 7.7).

3. Анализ зависимостей вероятности безотказной работы системы от времени (наработки) (рис. 7.5) показывает, что второй способ повышения надежности системы (структурное резервирование) предпочтительнее первого, так как в период наработки до  $2.85 \cdot 10^6$  часов вероятность

безотказной работы системы при структурном резервировании (кривая  $P''$ ) выше, чем при увеличении надежности элементов (кривая  $P'$ ).



## ЛИТЕРАТУРА

1. Левин В.И. Логическая теория надежности сложных систем. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 128 с.
2. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
3. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
4. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. - М.: Радио и связь, 1981. - 216 с.
5. ГОСТ 27.002 - 83 Надежность в технике. Термины и определения.
6. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. - М.: Высш. школа, 1970. - 270 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

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:

$$C_n^m = C_n^{n-m}$$

*Федеральное агентство по образованию Российской Федерации*  
*АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ*  
Инженерно-физический факультет

Р.Д. Редозубов

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**  
**ЗАДАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ**

**Благовещенск**  
**2007**

## Предисловие

Данные варианты заданий взяты из следующего источника

Королев В. Л., Сугак Е. В. Расчеты структурной надежности систем. Методические указания и задания к курсовому проектированию по курсу “Надежность и испытания МЭУ” для студентов направления 55.07.00. Красноярский государственный технический университет, Красноярск, 1997

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ

По структурной схеме надежности технической системы в соответствии с вариантом задания, требуемому значению вероятности безотказной работы системы  $\gamma$  и значениям интенсивностей отказов ее элементов  $\lambda_i$  (табл. 6.1) требуется:

1. Построить график изменения вероятности безотказной работы системы от времени наработки в диапазоне снижения вероятности до уровня 0.1 - 0.2.

2. Определить  $\gamma$  - процентную наработку технической системы.

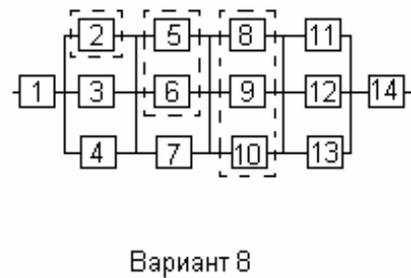
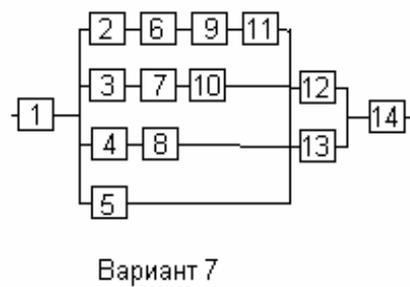
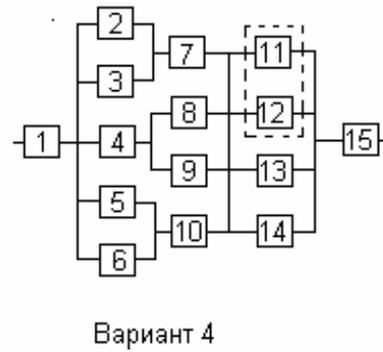
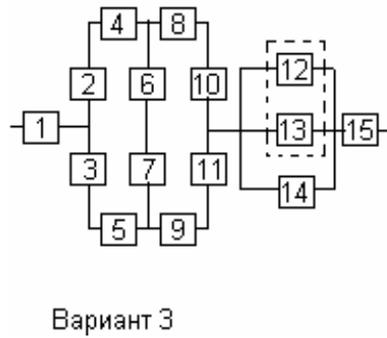
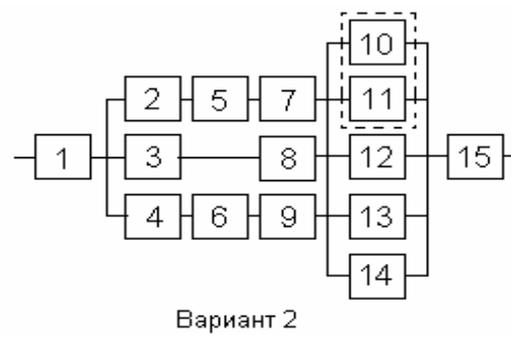
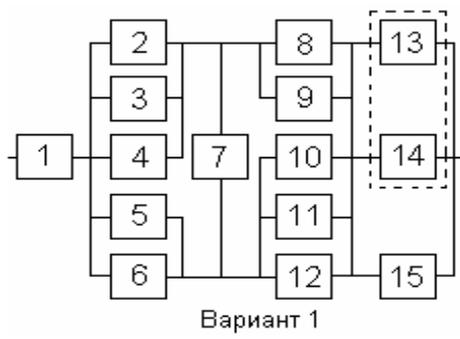
3. Обеспечить увеличение  $\gamma$  - процентной наработки не менее, чем в 1.5 раза за счет:

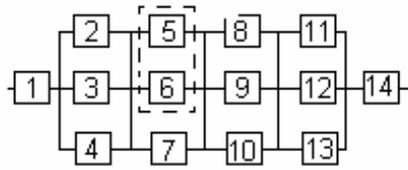
а) повышения надежности элементов;

б) структурного резервирования элементов системы.

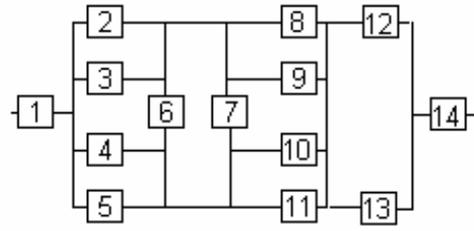
Все элементы системы работают в режиме нормальной эксплуатации (простейший поток отказов). Резервирование отдельных элементов или групп элементов осуществляется идентичными по надежности резервными элементами или группами элементов. Переключатели при резервировании считаются идеальными.

На схемах обведенные пунктиром  $m$  элементов являются функционально необходимыми из  $n$  параллельных ветвей.

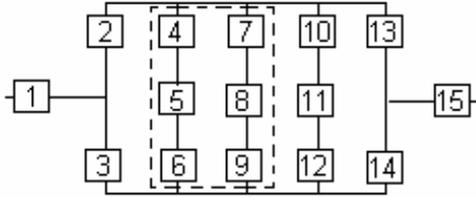




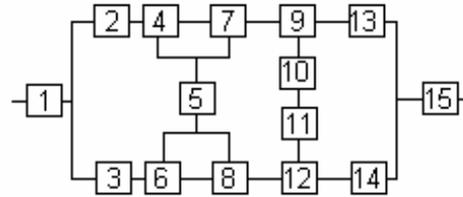
Вариант 9



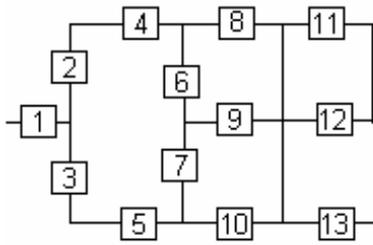
Вариант 10



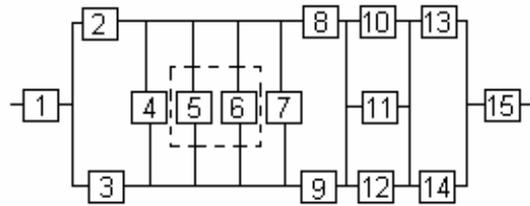
Вариант 11



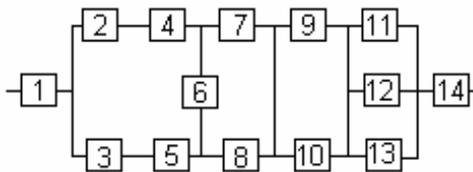
Вариант 12



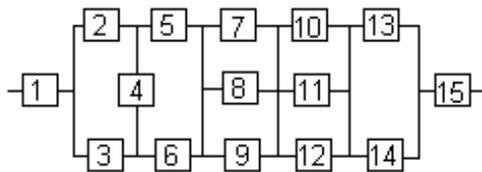
Вариант 13



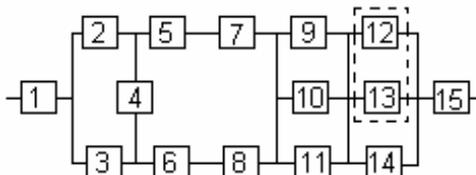
Вариант 14



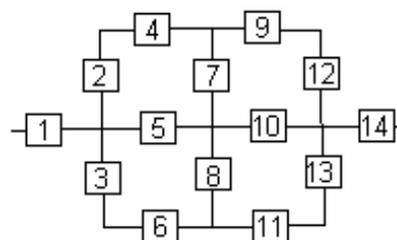
Вариант 15



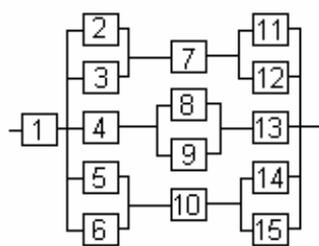
Вариант 16



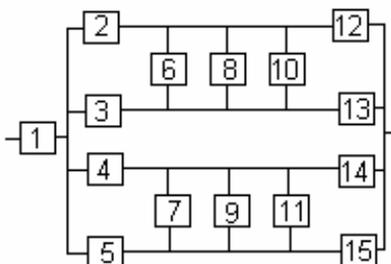
Вариант 17



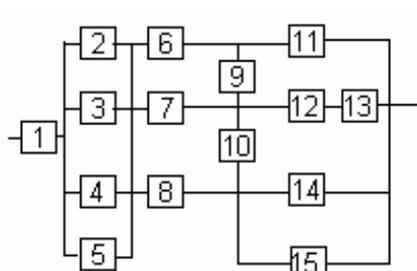
Вариант 18



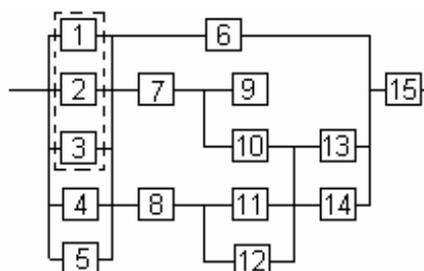
Вариант 19



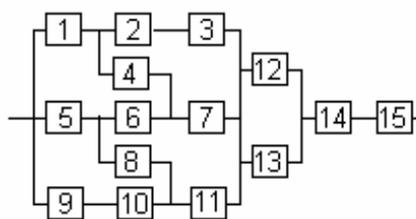
Вариант 20



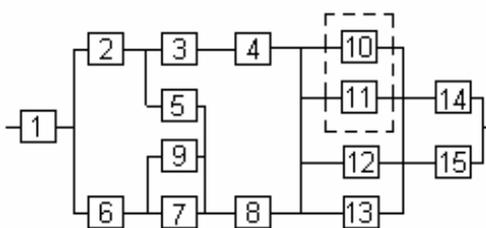
Вариант 21



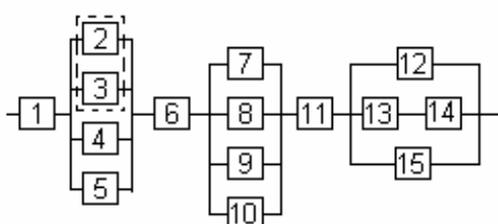
Вариант 22



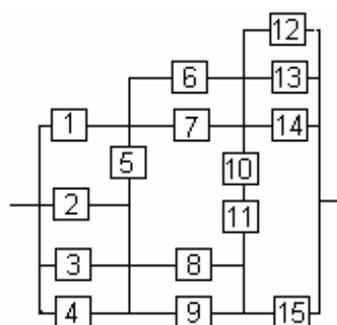
Вариант 23



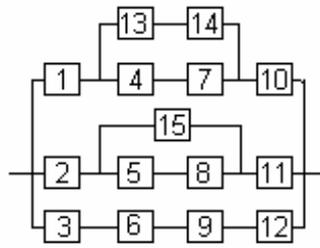
Вариант 24



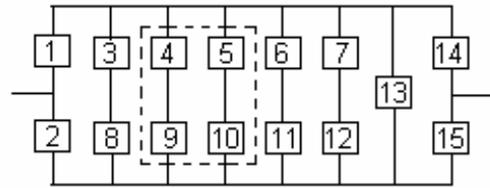
Вариант 25



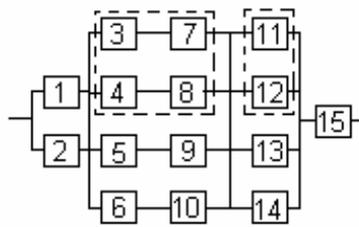
Вариант 26



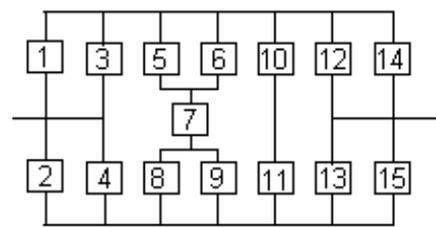
Вариант 27



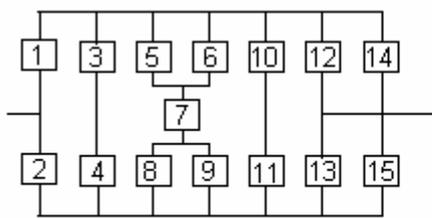
Вариант 28



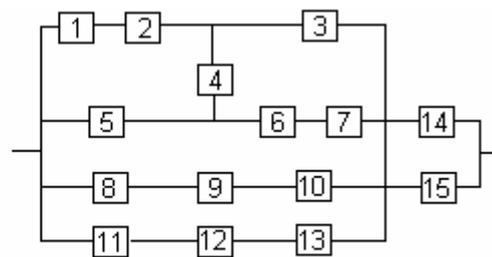
Вариант 29



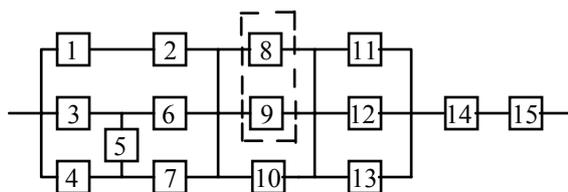
Вариант 30



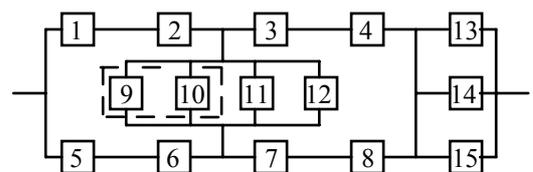
Вариант 31



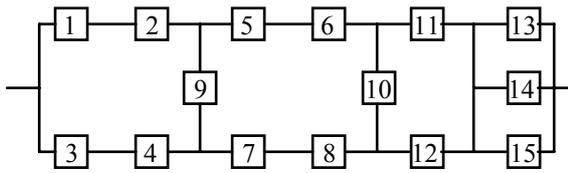
Вариант 32



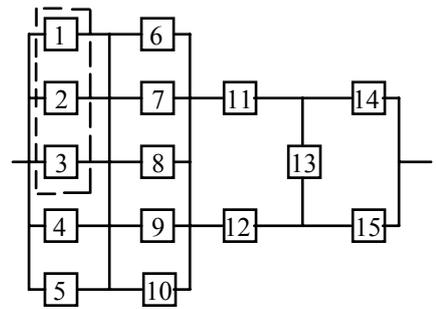
Вариант 33



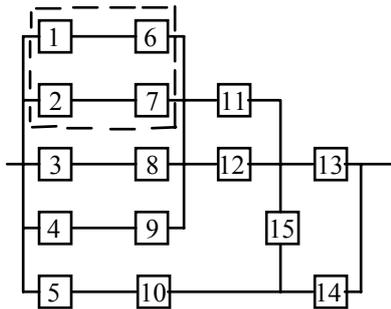
Вариант 34



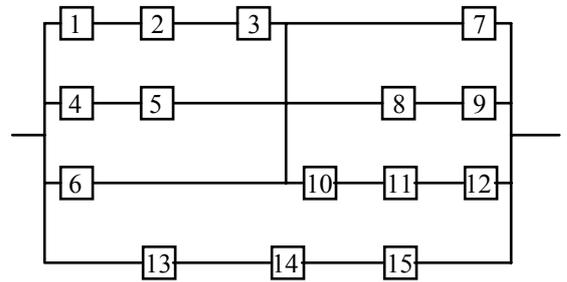
Вариант 35



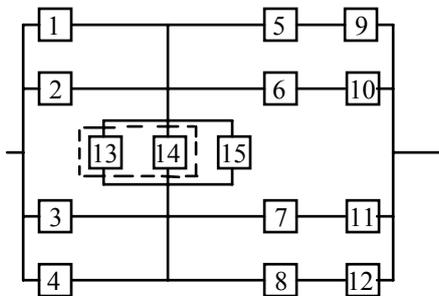
Вариант 36



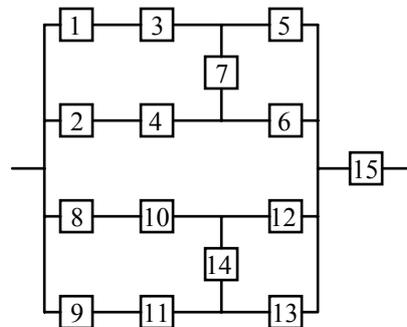
Вариант 37



Вариант 38



Вариант 39



Вариант 40

Численные значения параметров к заданию

№ вар.	γ, %	Интенсивности отказов элементов, $\lambda_i, \times 10^{-6} 1/ч$														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	90	0.1	1.0				0.5	1.0						0.1		
2	95	0.2	0.5							1.0					0.1	
3	80	0.1	1.0			2.0		1.0			5.0				0.2	
4	70	0.05	1.0				0.5				0.2				0.02	
5	50	0.01	0.05		0.1			0.5			1.0					
6	75	0.01	0.05		1.0							0.05	0.1		-	
7	65	0.05	0.5			0.05		0.005		0.1	0.2		0.1		-	
8	85	0.1	0.5		0.2			0.01		0.5			0.1		-	
9	60	0.03	0.5		0.2			1.0		0.03			0.1		-	
10	50	0.1	0.5			1.0		0.5			1.0		0.1		-	
11	75	0.05	0.2		0.5							0.2			0.1	
12	65	0.02	0.1		1.0			2.0				0.1			0.05	
13	70	0.01	0.2			0.1		1.0		0.5			0.1		-	
14	50	0.01	0.1		10.0			0.2		10.0		0.5			-	
15	85	0.01	1.0		5.0			0.2		5.0		0.1			-	
16	80	0.1	1.0		2.0	1.0		5.0		3.0		1.0			0.05	
17	95	0.1	5.0		1.0	5.0		10.0		5.0		1.0			0.2	
18	60	0.01	1.0											0.1	-	
19	75	0.1	5.0		0.5	5.0		1.0	3.0		1.0	5.0		0.5	5.0	
20	90	0.1	10.0				20.0					10.0				
21	90	0.1	1.0				0.5		2.0		0.5	0.2		1.0		
22	80	1.0					0.2	0.5	1.0	0.5	1.0		1.0		0.1	
23	70	0.5	0.2		1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.2	0.5	1.0		0.2		
24	60	1.0	2.0		4.0		2.0		4.0	5.0				1.0		
25	50	0.5	10.0				0.5	5.0			0.8	5.0	1.0		5.0	
26	60	1.0		2.0		3.0	5.0			2.0		5.0			1.0	
27	70	5.0			10.0			15.0		10.0			10.0	15.0	10.0	
28	80	1.0		2.0				5.0					2.0	1.0		
29	90	5.0			20.0			50.0				30.0			1.0	
30	80	2.0	1.0	2.0	1.0	5.0		2.0	5.0		2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	

31	70	2.0	1.0	2.0	1.0	5.0	2.0	5.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0		
32	60	5.0	2.0	5.0	1.0	2.0	3.0	1.0								
33	60	1.0	2.0	3.0	4.0	2.0	3.0	5.5	0.2	0.5						
34	90	6.0	3.0	6.0	3.0	6.0	20.0	10.0								
35	95	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	5.0									
36	80	2.0	1.0	0.6												
37	70	10.0	30.0	5.0	2.0											
38	90	3.0	2.0	1.0	2.0	3.0	2.0									
39	90	8.0	3.0	5.0	2.0											
40	80	2.0	5.0	8.0	2.0	5.0	8.0									
№	γ,	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
вар.	%	Интенсивности отказов элементов, $\lambda_i, \times 10^{-6} 1/ч$														

*Федеральное агентство по образованию Российской Федерации*  
*АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ*  
Инженерно-физический факультет

Р.Д. Редозубов

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК  
ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНАМ**

**Благовещенск  
2007**

## ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

Назовите характерные особенности ТС при анализе ее надежности.

2. Дайте определение основных понятий теории надежности.
3. Что такое надежность аппаратурная, программная, функциональная.
4. Что такое эффективность изделия. Укажите, какими показателями она измеряется.
5. Перечислите количественные показатели надежности.
6. Дать понятие математической теории надежности.
7. Дать понятие физической теории надежности.
8. Дать понятие статической теории надежности.
9. Требования к разработкам и исследованиям в области надежности.
10. Дать понятие надежности.
11. Дать понятие безотказности.
12. Дать понятие ремонтпригодности.
13. Дать понятие долговечности.
14. Дать понятие сохраняемости.
15. Дать понятие живучести.
16. Дать понятие отказа.
17. Дать понятие достоверности.
18. Виды отказов.
19. Виды эффективности.
20. Вероятность безотказной работы.
21. Вероятность отказа.
22. Интенсивность отказа.
23. Параметр потоков отказов восстанавливаемого объекта.
24. Средняя наработка до отказа.
25. Средняя наработка на отказ восстанавливаемого изделия.
26. Гамма процентная наработка до отказа.
27. Ресурс.
28. Срок службы.

29. Среднее время восстановления.
30. Назначенный срок хранения.
31. Коэффициент готовности.
32. Достоверность функционирования информационно-расчетного объекта.
33. Коэффициент оперативной готовности.
34. Коэффициент сохранения эффективности.
35. Направления совершенствования показателей надежности.
36. Основные факторы, влияющие на надежность ТС.
37. Способы рецензирования, используемые в ТС.
38. Виды контроля, используемого в ТС, и его влияние на надежность.
39. Климатические факторы, влиявшие на надежность ТС.
40. Роль и значение программного обеспечения в формировании показателей надежности ТС.
41. Основные средства обеспечения надежности ТС на этапе проектирования и эксплуатации.
42. Законы распределения, наиболее распространенные в теории надежности. Дать все и их особенности.
43. Свойства и условия возникновения экспоненциального и морального законов распределения.
44. Признаки и свойства простейшего потока отказов.
45. Сформулируйте понятие "вероятностный процесс" и приведите примеры вероятностных процессов в ТС.
46. Изложите порядок определения вероятности состояний стационарного «Марковского» процесса по заданным интенсивностям перехода.
47. Укажите преимущества и недостатки расчетных методов исследования надежности и области их применения.
48. Покажите связь между теорией расчетов надежности и математической логики, теории вероятностей и структурным анализом.

49. Укажите последовательность расчета надежности при использовании логического управления работоспособности.
50. Укажите последовательность расчета надежности при использовании графа возможных состояний изделий.
51. Приведите примеры структурных преобразований при расчетах надежности.
52. Перечислите типовые случаи расчета надежности и укажите возможные варианты исходных данных для каждого из этих случаев.
53. Перечислите виды испытаний на надежность и дайте их краткую характеристику.
54. Укажите принципиальные особенности испытаний на надежности ТС.
55. Дайте порядок обработки результатов определительных испытаний.
56. Укажите назначение и виды контрольных испытаний на надежность.
57. Укажите направления дальнейшего совершенствования испытаний на надежность.
58. Перечислите основные работы, выполняемые при подготовке моделирования и при его проведении.
59. Сформулируйте основную идею, положенную в основу получения случайных чисел с помощью специальных подпрограмм.
60. Укажите способ воспроизведения переходов объекта в различные состояния.
61. Укажите ход процесса моделирования по укрупненному моделирующему алгоритму.
62. Укажите преимущества и недостатки моделирования как метода исследования надежности.
63. Перечислите назначения и виды профилактических работ.

64. Укажите контролируемые параметры и возможные способы их выбора.
65. Изложите правила определения сроков профилактики.
66. Определите число запасных элементов в ЗИП по заданным.
67. Укажите специфические особенности планирования ЗИП для ТС.
68. Основные источники аварий и катастроф.
69. Классификация, статистика и прогнозирование аварий и катастроф.
70. Причины аварийности на производстве.
71. Аварийная подготовленность. Аварийное реагирование
72. Основы теории риска. Понятие риска.
73. Развитие риска на промышленных объектах.
74. Основы методологии анализа риска.
75. Нормативные значения риска. Допустимый риск.
76. Снижение опасности риска. Управление риском.
77. Моделирование риска. Принципы построения информационных технологий управления риском.

*Федеральное агентство по образованию Российской Федерации*  
*АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ*  
Инженерно-физический факультет

Р.Д. Редозубов

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК  
ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ОСТАТОЧНЫХ ЗНАНИЙ**

**Благовещенск  
2007**

### < Вопрос № 1 >

Работоспособность – это

- состояние объекта, при котором он способен выполнять все заданные функции в полном объеме
- состояние объекта, при котором он способен выполнять часть функций в частичном объеме
- состояние объекта, при котором он способен выполнять все или часть возложенных на него функций в полном или частичном объеме

### < Вопрос № 2 >

Основные задачи надежности

- Статистическая оценка и анализ надежности
- Прогнозирование надежности
- Синтез надежности на этапе проектирования
- Оптимизация показателей надежности
- Испытание объектов на надежность

### < Вопрос № 3 >

Отказ – это

- событие, заключающееся в нарушении работоспособности
- переход объекта с одного уровня работоспособности на другой
- переход объекта в неработоспособное состояние

### < Вопрос № 4 >

К нерабочему состоянию не относится

- нормальный режим
- ремонтный режим
- аварийный режим
- послеаварийный режим
- авария

### < Вопрос № 5 >

Управляемость – это

- свойство объекта, заключающееся в легкости им управления
- свойство объекта поддерживать нормальный режим посредством управления
- свойство объекта легко менять режимы посредством управления

### < Вопрос № 6 >

Устойчивоспособность объекта – это

- способность системы становиться устойчивой
- способность системы сохранять устойчивость в течении заданного времени
- свойство системы сохранять устойчивость в течении заданного режима

**< Вопрос № 7 >**

Сохраняемость объекта – это

- свойство объекта при его хранении
- свойство объекта сохранять показатели безотказности, долговечности и ремонтнопригодности в течении и после хранения
- свойство объекта сохранять показатели безотказности, долговечности и ремонтнопригодности во время и после транспортировки

**< Вопрос № 8 >**

Безопасность объекта – это

- свойство объекта не допускать опасных ситуаций для технологического процесса
- свойство объекта не допускать опасных ситуаций для окружающей среды
- свойство объекта не допускать опасных ситуаций для производства
- свойство объекта не допускать опасных ситуаций для жизни людей
- свойство объекта не допускать опасных ситуаций для живых организмов

**< Вопрос № 9 >**

Живучесть системы – это

- свойство системы противостоять возмущениям режима
- свойство системы , заключающееся в локальности отказа
- способность сохранять работу при предельных режимах

**< Вопрос № 10 >**

Глубина аварии – это

- уровень повреждения системы
- уровень расстройства функционирования системы
- уровень разрушения системы

**< Вопрос № 11 >**

Ремонтнопригодность объекта – это

- свойство объекта , заключающееся в возможности ремонтироваться
- свойство объекта, заключающееся в приспособлении к обнаружению причин возникновения отказов
- свойство объекта, заключающееся в возможности предупреждения отказов и их устранения путем проведения ремонтов

### < Вопрос № 12 >

Деление объекта на элемент и систему зависит от

- схемного анализа
- степени сложности
- оперативного управления
- конструктивного исполнения

### < Вопрос № 13 >

К единичному показателю безотказности не относятся

- вероятность безотказной работы
- вероятность восстановления
- интенсивность восстановления
- вероятность отказа
- частота отказа
- интенсивность отказа
- частота восстановления

### < Вопрос № 14 >

Вероятность безотказной работы – это

- функция надежности
- функция ненадежности
- вероятность того, что в пределах заданной наработки при заданных условиях отказа не произойдет
- противоположный показатель вероятности отказа

### < Вопрос № 15 >

Вероятность отказа – это

- функция надежности
- функция ненадежности
- вероятность того, что в пределах заданной наработки при заданных условиях произойдет отказ
- противоположный показатель вероятности безотказной работы

**< Вопрос № 16 >**

Частота отказа – это

- производная от функции ненадежности
- дифференциальная функция распределения
- число, показывающее, как часто объект отказывает
- отношение числа

*АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ*  
Энергетический факультет

Р.Д. Редозубов

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
ПЛАН ПРАКТИЧЕСКИХ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ**

**Благовещенск  
2007**

## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ (16 часов)

### *1. Количественные показатели надежности и эффективности -- 2ч.*

Вероятность безотказной работы, вероятность отказа, частота отказа, интенсивность отказа. Их значения для элемента. Статистическая оценка.

### *2. Случайные величины и их характеристики -- 2ч.*

Определение необходимого числа элементарных повреждений, приводящих к отказу. Отказ как случайное событие. Закон гамма-распределения, нормальный закон, экспоненциальный закон.

### *3. Вероятностные процессы -- 2ч.*

Вероятностные единичные показатели надежности – показатели безотказности и показатели восстанавливаемости:

- показатели безотказности -- вероятность безотказной работы и вероятность отказа, их взаимосвязь;
- показатели восстанавливаемости -- вероятность восстановления и вероятность не восстановления, их взаимосвязь.

### *4. Типовые случаи расчетов надежности -- 4ч.*

- расчет системы из последовательно соединенных элементов;
- расчет системы из параллельно соединенных элементов;
- расчет системы со смешанным соединением элементов;
- расчет мостиковой системы. Методы: перебора, биномом Ньютона, минимальных путей и сечений;
- расчет системы «m из n».

### *5. Расчет надежности изделий с учетом надежности программ -- 2ч.*

Принципы построения программного обеспечения с точки зрения надежности. Метод «упрощенной» программы.

*6. Расчет надежности с учетом глубины контроля -- 2ч.*

Принцип построения автоматизированных систем с самодиагностикой.

*7. Оценка точности моделирования надежности -- 2ч.*

Математическое определение необходимого количества элементов при синтезе надежности. Использование ПП «Matcad» при анализе и синтезе надежности методом последовательного приближения.