

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 14.11.2022 15:29:14  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



О. Г. Локтионова

14 ноября 2017 г.

## ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА РИСКА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Методические указания для выполнения  
практической работы по дисциплине  
«Надёжность технических систем и техногенный риск»  
для студентов, обучающихся по направлению  
«Техносферная безопасность»

Курск 2017

УДК 658.34:621.3

Составители: В.И. Томаков, М.В. Томаков

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *А.В. Беседин*

**Изучение методики анализа риска опасных производственных объектов:** методические указания для выполнения практической работы по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск» для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Томаков, М.В. Томаков. – Курск, 2017. – 28 с.

Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов содержат термины и понятия анализа риска, методические принципы анализа риска, общие требования к процедуре и оформлению результатов анализа, а также основные методы анализа опасностей и риска аварий на опасных производственных объектах.

Изучаемая методика анализа риска на практике являются основой для разработки методических документов (отраслевых методических указаний, рекомендаций, руководств, методик и т.п.) по проведению анализа риска на конкретных опасных производственных объектах.

При выполнении практической работы у обучающихся формируются компетенции: способностью оценивать риск и определять меры по обеспечению безопасности разрабатываемой техники (ПК-3); способностью определять опасные, чрезвычайно опасные зоны, зоны приемлемого риска (ПК-17).

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 27.01.2017 г. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,6. Уч. изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 1140. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет  
305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

### Цели практической работы:

- изучить основные термины и понятия анализа риска, принципы и основные методы анализа опасностей и риска аварий на опасных производственных объектах, общие требования к процедуре и оформлению результатов;
- приобретение теоретических знаний и практических навыков, необходимых для оценки и прогнозирования техногенного риска и разработки мероприятий по обеспечению безопасности разрабатываемой техники.

### Указания к выполнению практической работы

Изучите приведенный материал.

Законспектируйте содержание основных пунктов, свяжите их с проблемами техносферной безопасности.

Ответьте на вопросы и задания.

Номера вопросов и заданий по вариантам (номер списка группы)									
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
1	2	5	3	6	7	9	4	8	10
13	14	12	15	16	20	17	11	18	19
30	29	28	21	23	27	24	22	25	26

Номера вопросов и заданий по вариантам (номер списка группы)									
<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>
2	5	10	3	4	6	7	9	8	1
18	13	16	11	18	12	19	20	17	15
26	24	29	23	21	22	27	25	28	30

### Отчет о работе

1. Конспект основных положений, относящихся к основным методам анализа опасностей и риска аварий по пунктам 2 – 4 и приложениям 1, 2.

2. Письменные ответы на вопросы и задания.

## 1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В методических указаниях применяются следующие определения:

**Авария** – разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ

**Анализ риска аварии** – процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды.

**Идентификация опасностей аварии** – процесс выявления и признания, что опасности аварии на опасном производственном объекте существуют, и определения их характеристик.

**Опасность аварии** – угроза, возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде вследствие аварии на опасном производственном объекте. Опасности аварий на опасных производственных объектах связаны с возможностью разрушения сооружений и (или) технических устройств, взрывом и (или) выбросом опасных веществ с последующим причинением ущерба человеку, имуществу и (или) нанесением вреда окружающей природной среде.

**Опасные вещества** – воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества и вещества, представляющие опасность для человека и окружающей природной среды.

**Оценка риска аварии** – процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и (или) окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания.

**Приемлемый риск аварии** – риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из социально-экономических соображений. Риск эксплуатации объекта является приемлемым, если ради выгоды, получаемой от эксплуатации объекта, общество готово пойти на этот риск.

**Риск аварии** – мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тя-

жесть ее последствий. Основными количественными показателями риска аварии являются:

- *технический риск* – вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта;
- *индивидуальный риск* – частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий;
- *потенциальный территориальный риск* (или *потенциальный риск*) – частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке территории;
- *коллективный риск* – ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенное время;
- *социальный риск*, или *F/N-кривая*, – зависимость частоты возникновения событий  $F$ , в которых пострадало на определенном уровне не менее  $N$  человек, от этого числа  $N$ . Характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей;
- *экологический риск* – вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера;
- *ожидаемый ущерб* – математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии за определенное время.

**Требования промышленной безопасности** – условия, запреты, ограничения и другие обязательные требования, содержащиеся в федеральных законах и иных нормативных правовых актах Российской Федерации, а также в нормативных технических документах, которые принимаются в установленном порядке и соблюдение которых обеспечивает промышленную безопасность.

**Ущерб от аварии** – потери (убытки) в производственной и непроизводственной сфере жизнедеятельности человека, вред окружающей природной среде, причиненные в результате аварии на опасном производственном объекте и исчисляемые в денежном эквиваленте.

## 2. АНАЛИЗ РИСКА: ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

*Анализ риска или риск-анализ (risk analysis) – процесс идентификации опасностей и оценки риска для отдельных лиц, групп населения, объектов, окружающей природной среды и других объектов рассмотрения.*

1. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах (далее – анализ риска) является составной частью управления промышленной безопасностью.

Особенность анализа риска на опасных производственных объектах заключается в том, что в ходе его рассматриваются потенциально негативные последствия, которые могут возникнуть в результате отказа в работе технических систем, сбоев в технологических процессах или ошибок со стороны обслуживающего персонала.

Разумеется, что можно рассматривать и негативные воздействия на людей, и окружающую природную среду при безаварийном функционировании производства на других производственных объектах (за счет выбросов или утечки вредных или опасных веществ, неочищенных стоков и т.д.).

*Анализ риска заключается в систематическом использовании всей доступной информации для идентификации опасностей и оценки риска возможных нежелательных событий.*

2. Результаты анализа риска используются при декларировании промышленной безопасности опасных производственных объектов, экспертизе промышленной безопасности, обосновании технических решений по обеспечению безопасности, страховании, экономическом анализе безопасности по критериям «стоимость-безопасность-выгода», оценке воздействия хозяйственной деятельности на окружающую природную среду и при других процедурах, связанных с анализом безопасности.

3. Основные задачи анализа риска аварий на опасных производственных объектах заключаются в предоставлении лицам, принимающим решения:

– объективной информации о состоянии промышленной безопасности объекта;

– сведений о наиболее опасных, «слабых» местах с точки зрения безопасности;

– обоснованных рекомендаций по уменьшению риска.

4. Результаты анализа риска имеют существенное значение для принятия обоснованных и рациональных решений при определении места размещения и проектировании производственных объектов, при транспортировании и хранении опасных веществ и материалов. В процессе анализа риска находят широкое применение формализованные процедуры и учет разнообразных ситуаций, с которыми может столкнуться управляющий персонал в процессе своей деятельности, особенно при возникновении чрезвычайной обстановки. Неопределенность, в условиях которой во многих случаях должны приниматься управленческие решения, накладывает отпечаток на методику, ход и конечные результаты анализа риска.

5. Методы, используемые в процессе анализа, должны быть ориентированы, прежде всего, на выявление и оценку возможных потерь в случае аварии, стоимости обеспечения безопасности и преимуществ, получаемых при реализации того или иного проекта.

Анализ риска имеет ряд общих положений независимо от конкретного метода анализа и специфики решаемых задач. *Во-первых*, общей является задача определения допустимого уровня риска, стандартов безопасности обслуживающего персонала, населения и защиты окружающей природной среды. *Во-вторых*, определение допустимого уровня риска происходит, как правило, в условиях недостаточной или непроверенной информации, особенно когда это касается новых технологических процессов или новой техники. *В-третьих*, в ходе анализа в значительной мере приходится решать вероятностные задачи, что может привести к существенным расхождениям в получаемых результатах. *В-четвертых*, анализ риска нужно рассматривать, как процесс решения многокритериальных задач, которые могут возникнуть как компромисс между сторонами, заинтересованными в определенных результатах анализа.

6. Анализ риска может быть определен как процесс решения сложной задачи, требующий рассмотрения широкого круга вопросов и поведения комплексного исследования и оценки технических, экономических, управленческих, социальных, а в ряде случаев и политических факторов.

7. Анализ риска должен дать ответы на три основных вопроса:

1. Что плохого может произойти? (Идентификация опасностей).
2. Как часто это может случаться? (Анализ частоты).
3. Какие могут быть последствия? (Анализ последствий).

8. Четыре подхода к оценке риска.

**Первый** – инженерный. Он опирается на статистику поломок и аварий, на вероятностный анализ безопасности (ВАБ): построение и расчет так называемых «деревьев событий» и «деревьев отказов» – процесс основан на ориентированных графах. С помощью первых предсказывают, во что может развиться тот или иной отказ техники, а деревья отказов, наоборот, помогают проследить все причины, которые способны вызвать какое-то нежелательное явление. Когда деревья построены, рассчитывается вероятность реализации каждого из сценариев (каждой ветви), а затем – общая вероятность аварии на объекте.

**Второй подход**, модельный, – построение моделей воздействия вредных факторов на человека и окружающую среду. Эти модели могут описывать как последствия обычной работы предприятий, так и ущерб от аварий на них.

Первые два подхода основаны на расчетах, однако, для таких расчетов далеко не всегда хватает надежных исходных данных. В этом случае приемлем **третий подход** – экспертный: вероятности различных событий, связи между ними и последствия аварий определяют не вычислениями, а опросом опытных экспертов.

Наконец, в рамках **четвертого подхода** – социологического – исследуется отношение населения к разным видам риска, например с помощью социологических опросов.

То, что для определения риска используются четыре столь несхожих между собой метода, не должно удивлять. В разных задачах под риском следует понимать то вероятность какой-то аварии, то масштаб возможного ущерба от нее, а то и комбинацию двух этих величин.



## **3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА РИСКА**

### **3.1. Основные этапы анализа риска**

Процесс проведения анализа риска включает следующие основные этапы:

- планирование и организацию работ;
- идентификацию опасностей;
- оценку риска;
- разработку рекомендаций по уменьшению риска.

Содержание и основные требования к каждому этапу анализа риска определены в п.п.3.2-3.5.

Каждый этап анализа риска следует оформлять в соответствии с требованиями п.5.

### **3.2. Планирование и организация работ**

3.2.1. На этапе планирования работ следует:

- определить анализируемый опасный производственный объект и дать его общее описание;
- описать причины и проблемы, которые вызвали необходимость проведения анализа риска;
- подобрать группу исполнителей для проведения анализа риска;
- определить и описать источники информации об опасном производственном объекте;
- указать ограничения исходных данных, финансовых ресурсов и другие обстоятельства, определяющие глубину, полноту и детальность проводимого анализа риска;
- четко определить цели и задачи проводимого анализа риска;
- обосновать используемые методы анализа риска;
- определить критерии приемлемого риска.

3.2.2. Для обеспечения качества анализа риска следует использовать знание закономерностей возникновения и развития аварий на опасных производственных объектах. Если существуют результаты анализа риска для подобного опасного производственного объекта или аналогичных технических устройств, применяемых на опасном

производственном объекте, то их можно применять в качестве исходной информации. Однако при этом следует показать, что объекты и процессы подобны, а имеющиеся отличия не будут вносить значительных изменений в результаты анализа.

3.2.3. Цели и задачи анализа риска могут различаться и конкретизироваться на разных этапах жизненного цикла опасного производственного объекта.

3.2.3.1. На этапе размещения (обоснования инвестиций или проведения предпроектных работ) или проектирования опасного производственного объекта целью анализа риска, как правило, является:

- выявление опасностей и априорная количественная оценка риска с учетом воздействия поражающих факторов аварии на персонал, население, имущество и окружающую природную среду;

- обеспечение учета результатов при анализе приемлемости предложенных решений и выборе оптимальных вариантов размещения опасного производственного объекта, применяемых технических устройств, зданий и сооружений опасного производственного объекта, включая особенности окружающей местности, расположение иных объектов и экономическую эффективность;

- обеспечение информацией для разработки инструкций, технологического регламента и планов ликвидации (локализации) аварийных ситуаций на опасном производственном объекте;

- оценка альтернативных предложений по размещению опасного производственного объекта или техническим решениям.

3.2.3.2. На этапе ввода в эксплуатацию (вывода из эксплуатации) опасного производственного объекта целью анализа риска могут быть:

- выявление опасностей и оценка последствий аварий, уточнение оценок риска, полученных на предыдущих этапах функционирования опасного производственного объекта;

- проверка соответствия условий эксплуатации требованиям промышленной безопасности;

- разработка и уточнение инструкций по вводу в эксплуатацию (выводу из эксплуатации).

3.2.3.3. На этапе эксплуатации или реконструкции опасного производственного объекта целью анализа риска может быть:

- проверка соответствия условий эксплуатации требованиям промышленной безопасности;

- уточнение информации об основных опасностях и рисках (в том числе при декларировании промышленной безопасности);
- разработка рекомендаций по организации деятельности надзорных органов;
- совершенствование инструкций по эксплуатации и техническому обслуживанию, планов ликвидации (локализации) аварийных ситуаций на опасном производственном объекте;
- оценка эффекта изменения в организационных структурах, приемах практической работы и технического обслуживания в отношении совершенствования системы управления промышленной безопасностью.

3.2.4. При выборе методов анализа риска следует учитывать цели, задачи анализа, сложность рассматриваемых объектов, наличие необходимых данных и квалификацию привлекаемых для проведения анализа специалистов. Приоритетными в использовании являются методические материалы, согласованные или утвержденные Ростехнадзором России или иными федеральными органами исполнительной власти.

3.2.5. На этапе планирования выявляются управленческие решения, которые должны быть приняты, а также требующиеся для этого исходные и выходные данные.

3.2.6. Основным требованием к выбору или определению критерия приемлемого риска является его обоснованность и определенность. При этом критерии приемлемого риска могут задаваться нормативной документацией, определяться на этапе планирования анализа риска и (или) в процессе получения результатов анализа. Критерии приемлемого риска следует определять исходя из совокупности условий, включающих определенные требования безопасности и количественные показатели опасности. Условие приемлемости риска может выражаться в виде условий выполнения определенных требований безопасности, в том числе количественных критериев.

Основой для определения критериев приемлемого риска являются:

- нормы и правила промышленной безопасности или иные документы по безопасности в анализируемой области;
- сведения о происшедших авариях, инцидентах и их последствиях;

- опыт практической деятельности;
- социально-экономическая выгода от эксплуатации опасного производственного объекта.

### **3.3. Идентификация опасностей**

3.3.1. Основные задачи этапа идентификации опасностей - выявление и четкое описание всех источников опасностей и путей (сценариев) их реализации. Это ответственный этап анализа, так как не выявленные на этом этапе опасности не подвергаются дальнейшему рассмотрению и исчезают из поля зрения.

3.3.2. При идентификации следует определить, какие элементы, технические устройства, технологические блоки или процессы в технологической системе требуют более серьезного анализа и какие представляют меньший интерес с точки зрения безопасности.

3.3.3. Для идентификации опасностей рекомендуется применять методы, изложенные в п. 4.3.

3.3.4. Результатом идентификации опасностей являются:

- перечень нежелательных событий;
- описание источников опасности, факторов риска, условий возникновения и развития нежелательных событий (например, сценариев возможных аварий);
- предварительные оценки опасности и риска (например, при идентификации опасностей, при необходимости, могут быть представлены показатели опасности применяемых веществ, оценки последствий для отдельных сценариев аварий и т.п.).

3.3.5. Идентификация опасностей завершается также выбором дальнейшего направления деятельности. В качестве вариантов дальнейших действий может быть:

- решение прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей или достаточности полученных предварительных оценок (в этом случае под идентификацией опасностей подразумевается анализ или оценка опасностей);
- решение о проведении более детального анализа опасностей и оценки риска;
- выработка предварительных рекомендаций по уменьшению опасностей.

### 3.4. Оценка риска

#### 3.4.1. Основные задачи этапа оценки риска:

- определение частот возникновения инициирующих и всех нежелательных событий;
- оценка последствий возникновения нежелательных событий;
- обобщение оценок риска.

3.4.2. Для определения частоты нежелательных событий рекомендуется использовать:

- статистические данные по аварийности и надежности технологической системы, соответствующие специфике опасного производственного объекта или виду деятельности;
- логические методы анализа «деревьев событий», «деревьев отказов», имитационные модели возникновения аварий в человеко-машинной системе;
- экспертные оценки путем учета мнения специалистов в данной области.

3.4.3. Оценка последствий включает анализ возможных воздействий на людей, имущество и (или) окружающую природную среду. Для оценки последствий необходимо оценить физические эффекты нежелательных событий (отказы, разрушения технических устройств, зданий, сооружений, пожары, взрывы, выбросы токсичных веществ и т.д.), уточнить объекты, которые могут быть подвергнуты опасности. При анализе последствий аварий необходимо использовать модели аварийных процессов и критерии поражения, разрушения изучаемых объектов воздействия, учитывать ограничения применяемых моделей. Следует также учитывать и, по возможности, выявлять связь масштабов последствий с частотой их возникновения.

3.4.4. Обобщенная оценка риска (или степень риска) аварий должна отражать состояние промышленной безопасности с учетом показателей риска от всех нежелательных событий, которые могут произойти на опасном производственном объекте, и основываться на результатах:

- интегрирования показателей рисков всех нежелательных событий (сценариев аварий) с учетом их взаимного влияния;
- анализа неопределенности и точности полученных результатов;
- анализа соответствия условий эксплуатации требованиям про-

мышленной безопасности и критериям приемлемого риска.

При обобщении оценок риска следует, по возможности, проанализировать неопределенность и точность полученных результатов. Имеется много неопределенностей, связанных с оценкой риска. Как правило, основными источниками неопределенностей являются неполнота информации по надежности оборудования и человеческим ошибкам, принимаемые предположения и допущения используемых моделей аварийного процесса. Чтобы правильно интерпретировать результаты оценки риска, необходимо понимать характер неопределенностей и их причины. Источники неопределенности следует идентифицировать (например, «человеческий фактор»), оценить и представить в результатах.

В приложении 1 даны краткие характеристики основных количественных показателей риска.

### **3.5. Разработка рекомендаций по уменьшению риска**

3.5.1. Разработка рекомендаций по уменьшению риска является заключительным этапом анализа риска. В рекомендациях представляются обоснованные меры по уменьшению риска, основанные на результатах оценок риска.

3.5.2. Меры по уменьшению риска могут носить технический и (или) организационный характер. При выборе мер решающее значение имеет общая оценка действенности и надежности мер, оказывающих влияние на риск, а также размер затрат на их реализацию.

3.5.3. На стадии эксплуатации опасного производственного объекта организационные меры могут компенсировать ограниченные возможности для принятия крупных технических мер по уменьшению риска.

3.5.4. При разработке мер по уменьшению риска необходимо учитывать, что вследствие возможной ограниченности ресурсов в первую очередь должны разрабатываться простейшие и связанные с наименьшими затратами рекомендации, а также меры на перспективу.

3.5.5. В большинстве случаев первоочередными мерами обеспечения безопасности, как правило, являются меры предупреждения аварии. Выбор планируемых для внедрения мер безопасности имеет следующие приоритеты:

- меры по уменьшению вероятности возникновения аварийной ситуации, включающие:

- меры по уменьшению вероятности возникновения инцидента,
- меры по уменьшению вероятности перерастания инцидента в аварийную ситуацию,
- меры по уменьшению тяжести последствий аварии, которые, в свою очередь, имеют следующие приоритеты:
  - меры, предусматриваемые при проектировании опасного объекта (например, выбор несущих конструкций, запорной арматуры),
  - меры, относящиеся к системам противоаварийной защиты и контроля (например, применение газоанализаторов),
  - меры, касающиеся готовности эксплуатирующей организации к локализации и ликвидации последствий аварий.

3.5.6. При необходимости обоснования и оценки эффективности предлагаемых мер по уменьшению риска рекомендуется придерживаться двух альтернативных целей их оптимизации:

- при заданных средствах обеспечить максимальное снижение риска эксплуатации опасного производственного объекта;
- при минимальных затратах обеспечить снижение риска до приемлемого уровня.

3.5.7. Для определения приоритетности выполнения мер по уменьшению риска в условиях заданных средств или ограниченности ресурсов следует:

- определить совокупность мер, которые могут быть реализованы при заданных объемах финансирования;
- ранжировать эти меры по показателю «эффективность-затраты»;
- обосновать и оценить эффективность предлагаемых мер.

## **4. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА РИСКА**

4.1. При выборе методов проведения анализа риска необходимо учитывать этапы функционирования объекта (проектирование, эксплуатация и т.д.), цели анализа, критерии приемлемого риска, тип анализируемого опасного производственного объекта и характер опасности, наличие ресурсов для проведения анализа, опыт и квалификацию исполнителей, наличие необходимой информации и другие

факторы.

Так, на стадии идентификации опасностей и предварительных оценок риска (эта стадия может именоваться анализом опасностей.) рекомендуется применять методы качественного анализа и оценки риска, опирающиеся на продуманную процедуру, специальные вспомогательные средства (анкеты, бланки, опросные листы, инструкции) и практический опыт исполнителей.

Практика показывает, что использование сложных количественных методов анализа риска зачастую дает значения показателей риска, точность которых для сложных технических систем невелика. В связи с этим проведение полной количественной оценки риска более эффективно для сравнения источников опасностей или различных вариантов мер безопасности (например, при размещении объекта), чем для составления заключения о степени безопасности объекта. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях и единственно допустимы, в частности для сравнения опасностей различной природы, оценки последствий крупных аварий или для иллюстрации результатов.

Обеспечение необходимой информацией является важным условием проведения оценки риска. Вследствие недостатка статистических данных на практике рекомендуется использовать экспертные оценки и методы ранжирования риска, основанные на упрощенных методах количественного анализа риска. В этих подходах рассматриваемые события или элементы обычно разбиваются по величине вероятности, тяжести последствий и риска на несколько групп (или категорий, рангов), например, с высоким, промежуточным, низким или незначительным уровнем риска. При таком подходе высокий уровень риска может считаться (в зависимости от специфики объекта) неприемлемым (или требующим особого рассмотрения), промежуточный уровень риска требует выполнения программы работ по уменьшению уровня риска, низкий уровень считается приемлемым, а незначительный вообще может не рассматриваться (подробнее см. приложение 2).

4.2. При выборе и применении методов анализа риска рекомендуется придерживаться следующих требований:

- метод должен быть научно обоснован и соответствовать рассматриваемым опасностям;
- метод должен давать результаты в виде, позволяющем лучше



понять формы реализации опасностей и наметить пути снижения риска;

- метод должен быть повторяемым и проверяемым.

4.3. На стадии идентификации опасностей рекомендуется использовать один или несколько из перечисленных ниже методов анализа риска:

- «Что будет, если ...?»;

- проверочный лист;

- анализ опасности и работоспособности (АОР);

- анализ видов и последствий отказов (АВПО);

- анализ видов и последствий и критичности отказов (АВПКО);

- анализ «дерева отказов» (АДО);

- анализ «дерева событий» (АДС);

- анализ «дерева решений» (АДР);

- соответствующие эквивалентные методы.

Краткие сведения о методах анализа риска и рекомендации по их применению представлены в приложении 2.

## **5. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА РИСКА**

5.1. Результаты анализа риска должны быть обоснованы и оформлены таким образом, чтобы выполненные расчеты и выводы могли быть проверены и повторены специалистами, которые не участвовали при первоначальном анализе.

5.2. Процесс анализа риска следует документировать. Объем и форма отчета с результатами анализа зависят от целей проведенного анализа риска. В отчет рекомендуется включать (если иное не определено нормативными правовыми документами, например документами по оформлению деклараций промышленной безопасности):

- титульный лист;

- список исполнителей с указанием должностей, научных званий, названием организации;

- аннотацию;

- содержание (оглавление);

- задачи и цели проведенного анализа риска;

- описание анализируемого опасного производственного объекта;

- методологию анализа, исходные предположения и ограничения, определяющие пределы анализа риска;
- описание используемых методов анализа, моделей аварийных процессов и обоснование их применения;
- исходные данные и их источники, в том числе данные по аварийности и надежности оборудования;
- результаты идентификации опасности; результаты оценки риска;
- анализ неопределенностей результатов оценки риска; обобщение оценок риска, в том числе с указанием наиболее «слабых» мест;
- рекомендации по уменьшению риска;
- заключение;
- перечень используемых источников информации.

## Приложение 1 ПОКАЗАТЕЛИ РИСКА

Всесторонняя оценка риска аварий основывается на анализе причин (отказы технических устройств, ошибки персонала, внешние воздействия) возникновения и условий развития аварий, поражения производственного персонала, населения, причинения ущерба имуществу эксплуатирующей организации или третьим лицам, вреда окружающей природной среде. Чтобы подчеркнуть, что речь идет об «измеряемой» величине, используется понятие «степень риска» или «уровень риска». Степень риска аварий на опасном производственном объекте, эксплуатация которого связана со множеством опасностей, определяется на основе учета соответствующих показателей риска. В общем случае показатели риска выражаются в виде сочетания (комбинации) вероятности (или частоты) и тяжести последствий рассматриваемых нежелательных событий.

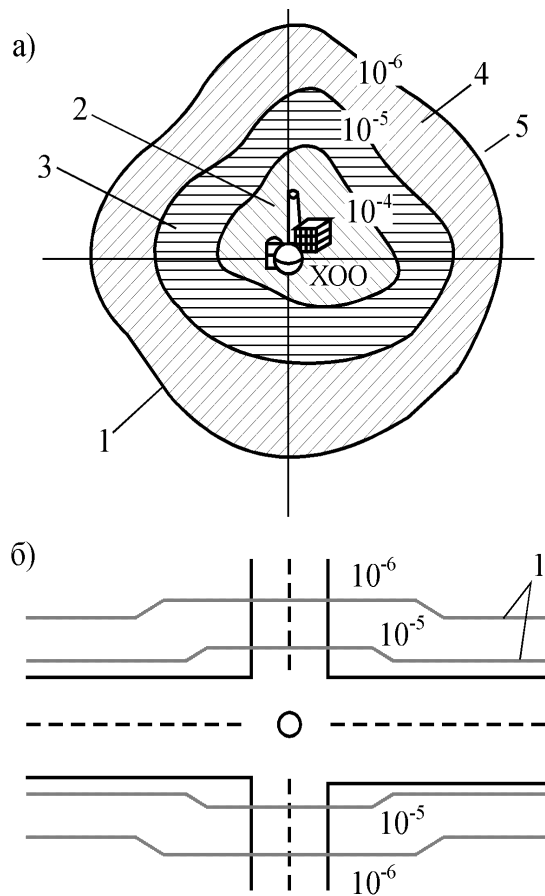
Ниже даны краткие характеристики основных количественных показателей риска.

1. При анализе опасностей, связанных с отказами технических устройств, выделяют **технический риск**, показатели которого определяются соответствующими методами теории надежности.

2. Одной из наиболее часто употребляющихся характеристик опасности является **индивидуальный риск** - частота поражения отдельного индивидуума (человека) в результате воздействия исследуемых факторов опасности. В общем случае количественно (численно) индивидуальный риск выражается отношением числа пострадавших людей к общему числу рискующих за определенный период времени. При расчете распределения риска по территории вокруг объекта (картировании риска) индивидуальный риск определяется потенциальным территориальным риском (см. ниже) и вероятностью нахождения человека в районе возможного действия опасных факторов. Так, при лицензировании деятельности нового крупного промышленного предприятия требуется предоставить топографическую карту риска, которому будет подвергаться человек, оказавшийся в зоне расположения этого предприятия. На этой карте должны быть указаны замкнутые кривые равного риска, каждая из которых соответствует следующим численным значениям вероятности смерти индивидуума в течение года:  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-7}$  (рис. 1). Требования такого же рода предъявлены и к уже действующим предприятиям.

Индивидуальный риск во многом определяется квалификацией и готовностью индивидуума к действиям в опасной ситуации, его защищенностью. Индивидуальный риск, как правило, следует определять не для каждого человека, а для групп людей, характеризующихся примерно одинаковым временем пребывания в различных опасных зонах и использующих одинаковые средства защиты. Рекомендуются оценивать индивидуальный риск отдельно для персонала объекта и для населения прилегающей территории или, при необходимости

сти, для более узких групп, например для рабочих различных специальностей.



1 – изолинии равного риска; 2, 3, 4, 5 – зона соответственно чрезвычайно высокого, высокого, приемлемого и низкого риска

Рисунок 1 – Построение зон индивидуального риска для опасного предприятия (а) и транспортной магистрали (б), по которой осуществляется перевозка опасных грузов

3. Другим комплексным показателем риска, характеризующим пространственное распределение опасности по объекту и близлежащей территории, является **потенциальный территориальный риск** - частота реализации поражающих факторов в рассматриваемой точке территории. Потенциальный территориальный, или потенциальный, риск не зависит от факта нахождения объекта воздействия (например, человека) в данном месте пространства. Предполагается, что условная вероятность нахождения объекта воздействия равна 1 (т.е. человек находится в данной точке пространства в течение всего рассматриваемого промежутка времени). Потенциальный риск не зависит от того, находится ли опасный объект в многолюдном или пустынном месте и может меняться в широком интервале. Потенциальный риск, в соответствии с названием, выражает собой потенциал максимально возможной опасности для конкретных объ-

ектов воздействия (реципиентов), находящихся в данной точке пространства. Как правило, потенциальный риск оказывается промежуточной мерой опасности, используемой для оценки социального и индивидуального риска при крупных авариях. Распределения потенциального риска и населения в исследуемом районе позволяют получить количественную оценку социального риска для населения. Для этого нужно рассчитать количество пораженных при каждом сценарии от каждого источника опасности и затем определить частоту событий  $F$ , при которой может пострадать на том или ином уровне  $N$  и более человек.

4. **Социальный риск** характеризует масштаб и вероятность (частоту) аварий и определяется функцией распределения потерь (ущерба), у которой есть установившееся название -  **$F/N$ -кривая** (в зарубежных работах - кривая Фармера).

В общем случае в зависимости от задач анализа под  $N$  можно понимать и общее число пострадавших, и число смертельно травмированных или другой показатель тяжести последствий. Соответственно критерий приемлемого риска будет определяться уже не числом для отдельного события, а кривой, построенной для различных сценариев аварии с учетом их вероятности. В настоящее время общераспространенным подходом для определения приемлемости риска является использование двух кривых, когда, например, в логарифмических координатах определены  $F/N$ -кривые приемлемого и неприемлемого риска смертельного травмирования. Область между этими кривыми определяет промежуточную степень риска, вопрос о снижении которой следует решать, исходя из специфики производства и региональных условий.

5. Другой количественной интегральной мерой опасности объекта является **коллективный риск**, определяющий ожидаемое количество пострадавших в результате аварий на объекте за определенное время.

6. Для целей экономического регулирования промышленной безопасности и страхования важным является такой показатель риска, как статистически **ожидаемый ущерб** в стоимостных или натуральных показателях.

## Приложение 2

### ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА РИСКА

Ниже представлена краткая характеристика основных методов, рекомендуемых для проведения анализа риска.

1. Методы **проверочного листа** и «**Что будет, если..?**» или их комбинация относятся к группе методов качественных оценок опасности, основанных на изучении соответствия условий эксплуатации объекта или проекта требованиям промышленной безопасности.

Результатом проверочного листа является перечень вопросов и ответов о соответствии опасного производственного объекта требованиям промышленной безопасности и указания по их обеспечению. Метод проверочного листа отличается от «Что будет, если..?» более обширным представлением исходной информации и представлением результатов о последствиях нарушений безопасности.

Эти методы наиболее просты (особенно при обеспечении их вспомогательными формами, унифицированными бланками, облегчающими на практике проведение анализа и представление результатов), нетрудоемки (результаты могут быть получены одним специалистом в течение одного дня) и наиболее эффективны при исследовании безопасности объектов с известной технологией.

2. **Анализ видов и последствий отказов (АВПО)** применяется для качественного анализа опасности рассматриваемой технической системы<sup>1</sup>. Существенной чертой этого метода является рассмотрение каждого аппарата (установки, блока, изделия) или составной части системы (элемента) на предмет того, как он стал неисправным (вид и причина отказа) и какое было бы воздействие отказа на техническую систему.

Анализ видов и последствий отказа можно расширить до количественного **анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО)**. В этом случае каждый вид отказа ранжируется с учетом двух составляющих критичности - вероятности (или частоты) и тяжести последствий отказа. Определение параметров критичности необходимо для выработки рекомендаций и приоритетности мер безопасности.

Результаты анализа представляются в виде таблиц с перечнем оборудования, видов и причин возможных отказов, с частотой, последствиями, критичностью, средствами обнаружения неисправности (сигнализаторы, приборы контроля и т.п.) и рекомендациями по уменьшению опасности.

Систему классификации отказов по критериям вероятности-тяжести последствий следует конкретизировать для каждого объекта или технического устройства с учетом его специфики.

---

<sup>1</sup> Под технической системой, в зависимости от целей анализа, могут пониматься как совокупность технических устройств, так и отдельные технические устройства или их элементы

Ниже (табл. 1) в качестве примера приведены показатели (индексы) уровня и критерии критичности по вероятности и тяжести последствий отказа. Для анализа выделены четыре группы, которым может быть нанесен ущерб от отказа: персонал, население, имущество (оборудование, сооружения, здания, продукция и т.п.), окружающая среда.

Таблица 1 – Матрица «вероятность-тяжесть последствий»

Отказ	Частота возникновения отказа в год	Тяжесть последствий отказа			
		катастрофического	критического	некритического	С пренебрежимо малыми последствиями
Частый	$> 1$	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>C</i>
Вероятный	$1 - 10^{-2}$	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Возможный	$10^{-2} - 10^{-4}$	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Редкий	$10^{-4} - 10^{-6}$	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Практически невероятный	$< 10^{-6}$	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>D</i>

В табл. 1 применены следующие варианты критериев:

- критерии отказов по тяжести последствий:

- катастрофический отказ - приводит к смерти людей, существенному ущербу имуществу, наносит невосполнимый ущерб окружающей среде;
- критический (некритический) отказ - угрожает (не угрожает) жизни людей, приводит (не приводит) к существенному ущербу имуществу, окружающей среде; отказ с пренебрежимо малыми последствиями - отказ, не относящийся по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий;

- категории (критичность) отказов:

*A* - обязателен количественный анализ риска или требуются особые меры обеспечения безопасности;

*B* - желателен количественный анализ риска или требуется принятие определенных мер безопасности;

*C* - рекомендуется проведение качественного анализа опасностей или принятие некоторых мер безопасности;

*D* - анализ и принятие специальных (дополнительных) мер безопасности не требуются.

Методы АВПО, АВПКО применяются, как правило, для анализа проектов сложных технических систем или технических решений. Выполняются группой специалистов различного профиля (например, специалистами по технологии, химическим процессам, инженером-механиком) из 3-7 человек в течение не-

скольких дней, недель.

3. Методом **анализа опасности и работоспособности (АОР)** исследуются опасности отклонений технологических параметров (температуры, давления и пр.) от регламентных режимов. АОР по сложности и качеству результатов соответствует уровню АВПО, АВПКО.

В процессе анализа для каждой составляющей опасного производственного объекта или технологического блока определяются возможные отклонения, причины и указания по их недопущению. При характеристике отклонения используются ключевые слова «нет», «больше», «меньше», «также, как», «другой», «иначе, чем», «обратный» и т.п. Применение ключевых слов помогает исполнителям выявить все возможные отклонения. Конкретное сочетание этих слов с технологическими параметрами определяется спецификой производства.

Примерное содержание ключевых слов следующее: «нет» - отсутствие прямой подачи вещества, когда она должна быть; «больше (меньше)» - увеличение (уменьшение) значений режимных переменных по сравнению с заданными параметрами (температуры, давления, расхода); «так же, как» - появление дополнительных компонентов (воздух, вода, примеси); «другой» - состояние, отличающиеся от обычной работы (пуск, остановка, повышение производительности и т.д.); «иначе, чем» - полное изменение процесса, непредвиденное событие, разрушение, разгерметизация оборудования; «обратный» - логическая противоположность замыслу, появление обратного потока вещества.

Результаты анализа представляются на специальных технологических листах (таблицах). Степень опасности отклонений может быть определена количественно путем оценки вероятности и тяжести последствий рассматриваемой ситуации по критериям критичности аналогично методу АВПКО (см. табл. 1).

Отметим, что метод АОР, так же как АВПКО, кроме идентификации опасностей и их ранжирования позволяет выявить неясности и неточности в инструкциях по безопасности и способствует их дальнейшему совершенствованию. Недостатки методов связаны с затрудненностью их применения для анализа комбинаций событий, приводящих к авариям.

4. Практика показывает, что крупные аварии, как правило, характеризуются комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях возникновения и развития аварии (отказы оборудования, ошибки человека, нерасчетные внешние воздействия, разрушение, выброс, пролив вещества, рассеяние веществ, воспламенение, взрыв, интоксикация и т.д.) Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют **логику-графические методы анализа «деревьев отказов» и «деревьев событий»**.

При анализе «деревьев отказов» (АДО) выявляются комбинации отказов (неполадок) оборудования, инцидентов, ошибок персонала и нерасчетных внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящие к головному событию (аварийной ситуации). Метод используется для анализа возможных причин возникновения аварийной ситуации и расчета ее частоты (на основе



знания частот исходных событий). При анализе «дерева отказа» (аварии) рекомендуется определять минимальные сочетания событий, определяющие возникновение или невозможность возникновения аварии.

Анализ «дерева событий» (АДС) - алгоритм построения последовательности событий, исходящих из основного события (аварийной ситуации). Используется для анализа развития аварийной ситуации. Частота каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события (например, аварии с разгерметизацией оборудования с горючим веществом в зависимости от условий могут развиваться как с воспламенением, так и без воспламенения вещества).

**5. Методы количественного анализа риска**, как правило, характеризуются расчетом нескольких показателей риска, упомянутых в приложении 1, и могут включать один или несколько вышеупомянутых методов (или использовать их результаты). Проведение количественного анализа требует высокой квалификации исполнителей, большого объема информации по аварийности, надежности оборудования, выполнения экспертных работ, учета особенностей окружающей местности, метеоусловий, времени пребывания людей в опасных зонах и других факторов.

Количественный анализ риска позволяет оценивать и сравнивать различные опасности по единым показателям, он наиболее эффективен:

- на стадии проектирования и размещения опасного производственного объекта;
- при обосновании и оптимизации мер безопасности;
- при оценке опасности крупных аварий на опасных производственных объектах, имеющих однотипные технические устройства (например, магистральные трубопроводы);
- при комплексной оценке опасностей аварий для людей, имущества и окружающей природной среды.

6. Рекомендации по выбору методов анализа риска для различных видов деятельности и этапов функционирования опасного производственного объекта представлены ниже (табл. 2).

Таблица 2 – Рекомендации по выбору методов анализа риска

Метод	Вид деятельности				
	Размещение (предпроектные работы)	Проектирование	Ввод или вывод из эксплуатации	Эксплуатация	Реконструкция
Анализ «Что будет, если...?»	0	+	++	++	+
Метод проверочного листа	0	+	+	++	+

Метод	Вид деятельности				
	Размещение (предпроект- ные работы)	Проектиро- вание	Ввод или вывод из эксплуата- ции	Эксплуа- тация	Реконст- рукция
Анализ опасно- сти и работо- способности	0	++	+	+	++
Анализ видов и последствий отказов	0	++	+	+	++
Анализ «де- реьев отказов и событий»	0	++	+	+	++
Количествен- ный анализ риска	++	++	0	+	++

В табл. 2 приняты следующие обозначения: 0 - наименее подходящий метод анализа; + - рекомендуемый метод; ++ - наиболее подходящий метод.

Методы могут применяться обособленно или в дополнение друг к другу, причем методы качественного анализа могут включать количественные критерии риска (в основном, по экспертным оценкам с использованием, например, матрицы «вероятность-тяжесть последствий» ранжирования опасности). По возможности полный количественный анализ риска должен использовать результаты качественного анализа опасностей.

### Вопросы и задания

1. Для каких целей используются результаты анализа риска?
2. Что является результатом идентификации опасностей?
3. Перечислите основные этапы анализа риска.
4. В чем заключаются задачи этапа идентификации опасностей?
5. На какие основные вопросы должен дать ответы анализ риска?
6. В чем заключается инженерный подход к оценке риска?
7. Закончите фразу: «Показателем риска, характеризующим пространственное распределение опасности по объекту и близлежащей территории, является ...».
8. Назовите численные выражения индивидуального риска.
9. В чем выражаются показатели риска?
10. Какие объективные обстоятельства (цели, задачи, ситуации и т.п.) следует учитывать при выборе методов анализа риска ?
11. Раскройте определение: «Риск аварии».
12. В каком случае риск эксплуатации объекта является приемлемым?
13. В чем заключается различие между индивидуальным риском и коллективным риском?
14. Какой риск (вид риска) характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей для населения?
15. В чем выражается ущерб от аварии (реализации опасностей)?
16. Закончите предложение: «При идентификации следует определить ...».
17. На каком этапе анализа риска выполняется проверка соответствия условий эксплуатации опасного производственного объекта требованиям промышленной безопасности?
18. На каком этапе анализа риска выполняется выявление опасностей и априорная количественная оценка риска с учетом воздействия поражающих факторов аварии на персонал, население, имущество и окружающую природную среду?
19. На каком этапе анализа риска выполняется оценка альтернативных предложений по размещению опасного производственного объекта?
20. Чем обусловлен (вызван) технический риск?
21. Чем обусловлен (вызван) индивидуальный риск?
22. Закончите определение: «Показатели риска выражаются в виде...».
23. С какой целью по территории вокруг объекта выполняется картирование риска?
24. В чём заключается отличие критического отказа от катастрофического отказа технической системы?

25. Закончите определение: «Методы проверочного листа и «Что будет, если...?» или их комбинация относятся к группе методов ...».

26. Что является результатом применения метода проверочного листа?

27. В каких случаях применяется метод «Анализ видов и последствий отказов (АВПО)»?

28. В каких обстоятельствах применяется метод «Анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО)»?

29. Какие вероятные опасности исследуются методом «Анализ опасности и работоспособности (АОР)» или «Ключевых слов»?

30. Какие методы применяют для выявления причинно-следственных связей между несколькими случайными событиями, приведшими к аварии (или могущими привести к аварии)?

### Список источников информации

1. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / под общ. ред. М. И. Фалеева. - М.: Деловой экспресс, 2002. - 368 с.

### Содержание

1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	4
2. АНАЛИЗ РИСКА: ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	6
3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА РИСКА.....	9
3.1. Основные этапы анализа риска.....	9
3.2. Планирование и организация работ.....	9
3.3. Идентификация опасностей.....	12
3.4. Оценка риска.....	13
3.5. Разработка рекомендаций по уменьшению риска.....	14
4. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА РИСКА.....	15
5. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА РИСКА...	17
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПОКАЗАТЕЛИ РИСКА.....	19
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА РИСКА.....	22
Вопросы и задания.....	27
Список источников информации.....	28

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



О. Г. Локтионова

2017 г.

## ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ ОТКАЗОВ

Методические указания для выполнения  
практической работы по дисциплине  
«Надёжность технических систем и техногенный риск»  
для студентов, обучающихся по направлению  
«Техносферная безопасность»

Курск 2017

УДК 658.34:621.3

Составители: В.И. Томаков, М.В. Томаков

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *А.В. Беседин*

**Построение деревьев отказов** : методические указания для выполнения практической работы по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск» для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Томаков, М.В. Томаков. – Курск, 2017. – 23 с.

Изучается методика построения деревьев отказов. Построение дерева отказов является одним из методов идентификации опасностей и оценивания риска появления нежелательного события.

При выполнении практической работы у обучающихся формируется компетенции: способностью оценивать риск и определять меры по обеспечению безопасности разрабатываемой техники (ПК-3); способностью использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности (ПК-4).

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 27. 01. 2017 г. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 1,2. Уч. изд. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ 53. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## **Общие положения о выполнении практической работы**

### **Цель практической работы:**

- изучить методику построения дерева отказов;
- приобретение практических навыков, необходимых для идентификации опасностей и оценивания риска появления нежелательного события.

### **Указания к выполнению практической работы**

Законспектируйте содержание основных положений порядка качественной оценки дерева отказов, основные понятия, а также алгоритм действий и необходимые для выполнения работы правила.

Выполните задания по указанию преподавателя.

Ответьте письменно на тесты, вопросы и задания по указанию преподавателя.

### **Отчет о выполненной работе**

#### **1. Конспект, включающий:**

- основные понятия о методе построения дерева отказов;
- основные понятия (определения) метода;
- основные положения и алгоритм построения дерева отказов.

#### **2. Необходимые схемы и построения.**

**3. Письменные ответы на контрольные тесты, вопросы и задания.**

Работа должна быть выполнена собственноручно.

Отчет следует предоставить на сброшюрованных листах формата А4 или в отдельной ученической тетради.

Схемы следует выполнять, используя чертежные шаблоны или инструменты.

## Введение

Тщательному анализу причин отказов технической системы и выработке мероприятий, наиболее эффективных для их устранения, способствует построение дерева отказов. Такой анализ проводят для каждого периода функционирования системы, каждой части или системы в целом.

Деревья отказов являются графологическими структурами, их построение, качественный и количественный анализ позволяют прогнозировать техногенный риск.

Основной целью анализа надёжности технических систем, риска и безопасности является уменьшение вероятности аварий и связанных с ними человеческих жертв, экономических потерь и нарушений в окружающей среде. Опасности в системах часто вызываются сочетанием сразу нескольких типов отказов, т. е. отказами оборудования плюс ошибками человека и (или) стихийными бедствиями.

Главной целью при изучении опасностей, свойственных технической системе, является определение причинных взаимосвязей между исходными аварийными событиями, относящимися к оборудованию, персоналу и окружающей среде и приводящими к авариям в системе, а также отыскание способов устранения вредных воздействий путем перепроектирования системы или ее усовершенствования. Причинные взаимосвязи можно установить с помощью дерева отказов, которое затем подвергается качественному и количественному анализам. После того как сочетания исходных аварийных событий, ведущих к возникновению опасных ситуаций в системе, выявлены, система может быть усовершенствована и опасности уменьшены.

Метод анализа с помощью дерева отказов был разработан в лаборатории *Bell Telephone Laboratories* в 1961-1962 гг. при проведении анализа надёжности системы управления запуском ракеты «Минитмен» по контракту с Военно-воздушными силами США. В дальнейшем метод был значительно усовершенствован специалистами фирмы *Boeing Company*.

Первыми публикациями были доклады, представленные в 1965 г. на симпозиуме по надёжности, организованном Университетом штата Вашингтон и фирмой «Боинг», в которой группа специалистов использовала и развила эти методы. Другой симпозиум был организован Калифорнийским университетом и целиком посвящен данному



методу. Широкое признание метод получил после этих двух симпозиумов.

В Российской Федерации указания и рекомендации по применению метода «Дерево отказов» для оценки надёжности технических систем, анализа риска и обзор других возможных состояний технических систем регламентируются государственными стандартами и нормативно-технической документацией [1-4] и др.

Ценность дерева отказов заключается в следующем:

- анализ ориентируется на нахождение отказов как после свершившегося события (например, аварии), так и на стадии проектирования системы;
- позволяет показать в явном виде ненадежные места системы для рассматриваемых объектов;
- обеспечивается графикой и представляет наглядный материал для той части работников, которые не информируются о проводимых изменениях конструкции;
- дает возможность выполнять качественный или количественный анализ надежности системы;
- метод позволяет специалистам поочередно сосредотачиваться на отдельных конкретных отказах системы;
- обеспечивает глубокое представление о поведении системы и проникновение в процесс ее работы;
- являются средством общения специалистов из разных организаций, поскольку они представлены в четкой наглядной графологической форме с использованием общепринятых условных обозначений и записей;
- помогает дедуктивно выявлять отказы;
- дает конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений или установления уровня соответствия (несоответствия) конструкции системы заданным требованиям надёжности и анализа компромиссных решений;
- облегчает анализ надежности сложных систем.

*Главное преимущество дерева отказов (по сравнению с другими методами) заключается в том, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов системы и событий, которые приводят к данному конкретному отказу системы или аварии.*

*Недостатки дерева отказов состоят в следующем:*

- реализация метода ДО требует значительных затрат средств и времени, т. к. требует от специалистов глубокого понимания существа технической системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа;
- трудности в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащие резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов;
- трудно учесть состояние частичного отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа.

## **1 Структура и свойства дерева отказов**

Дерево отказов (аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий, несчастных случаев, неработоспособных состояний и пр.) лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов и другими событиями (воздействиями).

*Дерево отказов представляет собой схему булевой логики, на которой показывают только два состояния: рабочее и отказавшее (т. е. работает логический принцип «Да» или «Нет»).* Например, работающий электродвигатель и отказавший (двигатель, выдающий половину мощности, считается неработающим).

*Дерево отказов описывает систему в определенный момент времени с набором определенных событий, состояний и воздействий.* Последовательности событий в ДО могут быть показаны только для конкретных фиксированных событий, состояний и воздействий. Таким образом, дерево отказов отражает статический характер событий. Построением нескольких деревьев для разных периодов можно отразить динамику, т. е. развитие событий во времени,

Дерево отказов – специально организованное графическое представление условий или других факторов, вызывающих нежелательное событие, *называемое вершиной графа или завершающим событием.* Представление приводят в форме, которая может быть понята, проанализирована и, по мере необходимости, перестроена таким образом, чтобы облегчить идентификацию:

- факторов, воздействующих на надежность и характеристики системы, например, отказов элементов системы, ошибок оператора, условий окружающей среды, ошибок программного обеспечения и пр.;
- противоречивых требований или спецификаций, которые могут влиять на надежность системы;
- общих событий, воздействующих более чем на один функциональный элемент в схеме.

При анализе возникновения отказа (аварии, происшествия и т.п.) дерево отказов (ДО) состоит из последовательностей и комбинаций нарушений (воздействий, неисправностей и т.п.), и таким образом оно *представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания связей опасных ситуаций (состояний, воздействий и т. п.)*.

На практике используют *обратную или прямую последовательность* выявления условий возникновения конкретных нежелательных событий:

а) от головного события *дедуктивно* к отдельным предпосылкам (обратная последовательность);

б) от отдельных предпосылок *индуктивно* к головному событию (прямая последовательность).

Чаще используют обратную последовательность.

На рисунке 1 показан граф дерева отказов, состоящий из нескольких уровней. Количество уровней может быть уменьшено или увеличено в зависимости от цели исследования и имеющейся информации.

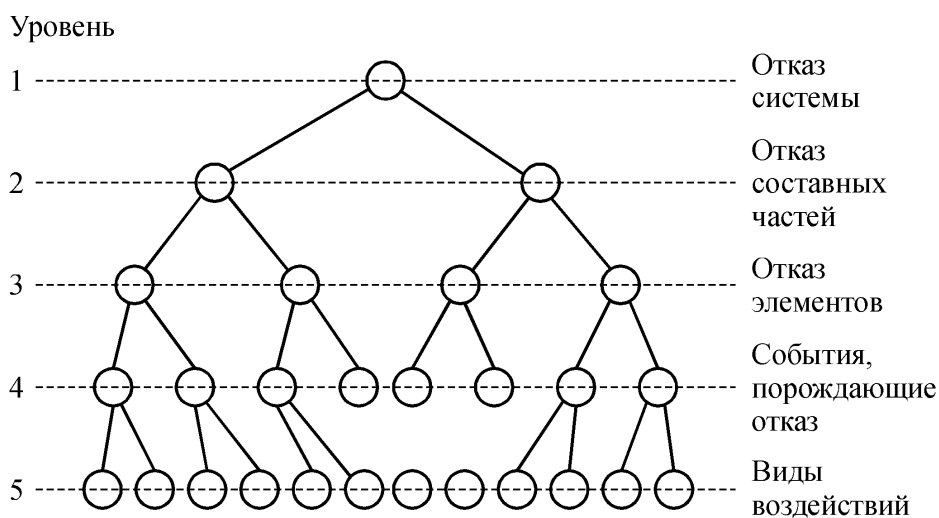


Рисунок 1 – Граф дерева отказов

Структура дерева отказов (рисунок 1) включает одно, размещаемое сверху нежелательное событие (уровень 1) – происшествие (авария, несчастный случай, пожар и т. п.).

Это событие соединяется с набором соответствующих исходных событий - предпосылок (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий и т. п.), образующих определенные их цепи или «ветви». «Листьями» на ветвях дерева отказов служат исходные события (предпосылки) - инициаторы причинных связей, рассматриваемые как *постулируемые исходные события*, дальнейшая детализация которых не целесообразна.

Разработка дерева отказов в обратном порядке заключается в определении его структуры:

а) элементов - головного события (происшествия) и ему предшествующих предпосылок;

б) связей между ними - логических условий, соблюдение которых необходимо и достаточно для его возникновения.

Разработка дерева отказов в прямом порядке заключается в определении его структуры:

а) исходных событий (происшествий, отказов, воздействий и т. п.) и предшествующих предпосылок, которые могут привести к завершающему (головному) событию;

б) связей между ними - логических условий, соблюдение которых необходимо и достаточно для его возникновения.

## **2 Рассматриваемые события в дереве отказов**

Событие - это появление какого-либо состояния (например, отказ элемента) или действия (например, землетрясение). В дерево отказов должны включаться события, являющиеся следствием всех исходных причин. Такие причины должны включать результаты воздействия всех условий (окружающей среды или других условий, состояний и т. п., которые могут воздействовать на элемент системы, включая те, появление которых возможно в процессе работы, даже если они не предусмотрены в проектной спецификации, например, удар молнии в трансформаторную подстанцию).

Если выходное событие определяет неспособность системы исполнять некую функцию, то соответствующими входными событиями могут быть неисправности оборудования или ограничения эффек-

тивности.

Если выходное событие определяет неисправность оборудования, то соответствующими входными событиями могут быть неисправности оборудования, ошибки управления и нехватки необходимых ресурсов, если они не включены в дерево неисправностей как часть ограничений эффективности.

При необходимости дерева отказов должны учитывать последствия ошибок человека-оператора, ошибок и неточностей в программном обеспечении, когда в дереве отказов учитывается контроль состояния и управления технической системой.

Разработка дерева неисправностей начинается с определения (формулирования) вершины событий в каждом уровне. Вершина событий является следствием соответствующих входных событий из нижнего уровня, определяющих возможные причины и условия появления вершины событий. Это видно из рисунка 1. Например, уровень 5 имеет входные события - некие виды воздействия, а на выходе - события, порождающие отказ элемента системы (4-й уровень) и они являются входными событиями для 3-го уровня.

Развитие отдельной ветви дерева неисправностей заканчивается после того, как достигнуты события, которые не должны разрабатываться далее. Это может быть далее неразвиваемое событие - т.е. событие, не имеющее входных событий, или это событие которое является базисным - т.е. событием, которое не может, и не будет развиваться в дальнейшем. Развитие отдельной ветви дерева неисправностей может быть закончено по решению аналитиков ввиду и других причин, например события, которые были или будут рассмотрены в дальнейшем в другом дереве неисправностей.

### **3 Процедура построения дерева отказов**

Основной принцип построения дерева отказов заключается в последовательной постановке вопроса, по каким причинам произошёл отказ (апостериорный подход) или может произойти отказ (априорный подход) системы?

Анализ, как правило, осуществляется «сверху вниз».

Исследователь, прежде чем приступить к построению дерева отказов для изучения поведения системы, тщательно изучает техниче-

скую систему (описание системы, назначение, состав, схему, поведение элементов, воздействия и пр.). Если он строит дерево отказов для произошедшего события, он изучает причины, приведшие к событию и условия, их вызвавшие.

Процедура построения дерева отказов включает, как правило, следующие основные этапы:

1. Определение нежелательного (завершающего) события в рассматриваемой системе.

2. Определение событий более высокого уровня для выявления тех или иных причин отказов системы и проведение анализа поведения системы с целью выявления логической взаимосвязи событий более низкого уровня, способных привести к отказу системы.

3. Собственно графическое построение дерева отказов с логически связанными событиями на входе.

**Основой построения дерева отказов является символическое представление существующих в системе условий - событий, способных вызвать отказ.** При построении дерева отказов учитывают и используют следующие основные виды событий:

- *результатирующее событие* - нежелательное событие (конкретный вид отказа системы из перечня возможных отказов), анализ которого проводится;

- *промежуточное событие* - сложное событие с логическим оператором, являющееся одной из возможных причин результирующего события. Его выявляют в ходе анализа причин результирующего события и подвергают дальнейшему анализу;

- *базовое событие* - простое исходное событие, означающее первичный отказ, которое дальше не анализируется в связи с определенностью и наличием достаточного числа данных;

- *неполное событие* - недостаточно детально разработанное событие, которое дальше не анализируется, из-за невозможности или отсутствия необходимости проведения его анализа.

**Исходными событиями при построении дерева отказов являются перечни возможных видов событий** - отказов и их причин, нерасчетные значения внешних воздействующих факторов и др. Соответственно, каждому виду события и логического оператора присваиваются символы, которые используются для графического построения дерева отказов. Логические символы связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями.

Построение дерева и анализ исследуемого объекта с его использованием производят следующим образом.

1. Определяют аварийное (предельно опасное, конечное) событие, которое образует вершину дерева. Данное событие четко формулируют, оговаривают условия его появления, дают признаки его точного распознавания. Например, для объектов химической технологии к таким событиям относятся: разрыв аппарата, пожар, выход реакции из-под контроля и др. Определяют возможные первичные и вторичные отказы, которые могут вызвать головное событие, рассматривают их комбинации.

2. Используя стандартные символы событий и логические символы, дерево строят в соответствии со следующими правилами:

- а) конечное (аварийное) событие помещают вверху (уровень 1);
- б) дерево состоит из последовательности событий, которые ведут к конечному событию;
- в) последовательности событий образуются с помощью логических знаков *И*, *ИЛИ* и др.;
- г) событие над логическим знаком помещают в прямоугольнике, а само событие описывают в этом прямоугольнике;
- д) первичные события (исходные причины) располагают снизу.

Первичные и неразлагаемые события соединяются с событиями первого уровня маршрутами (ветвями). Сложное дерево имеет различные наборы исходных событий, при которых достигается событие в вершине.

Деревья неисправностей могут быть изображены в вертикальном или горизонтальном расположении. Если используется вертикальное расположение, то вершина событий должна быть расположена наверху страницы, а основные события - внизу. Если используется горизонтальное расположение, то вершина событий может быть расположена слева или справа страницы.

Как правило, практически используется вертикальное расположение дерева отказов.

#### **4 Символьное представление дерева отказов**

Чтобы отыскать и наглядно представить причинную взаимосвязь с помощью дерева отказов, необходимы элементарные блоки, подразделяющие и связывающие большое число событий. *Имеется*

два типа блоков: логические символы (знаки) и символы событий.

**Логические символы.** Логические символы (знаки) связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями. Обозначения логических знаков приведены в таблице 1. Логический символ (знак) может иметь один или несколько входов, но только один выход, или выходное событие.

Таблица 3 - Логические символы

Символ логического знака	Название логического знака	Причинная взаимосвязь
 Выход Входы	знак <b><i>И</i></b>	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно
 Выход Входы	знак <b><i>ИЛИ</i></b>	Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий
	знак <b><i>Приоритетное И</i></b>	Выходное событие случается, если все входные события происходят в нужном порядке (в схеме указываются, как правило, слева направо)
	<b><i>Исключающее ИЛИ</i></b>	Выходное событие происходит, если случается одно (но не оба) из входных событий
	Знак « <i>m</i> из <i>n</i> » (голосования или выборки)	Выходное событие происходит, если случается <i>m</i> из <i>n</i> входных событий, например, два из трёх событий

Логический знак ***И*** (схема совпадения).

**Выходное событие логического знака ***И*** наступает в том случае, если все входные события появляются одновременно.**

**Правило формулирования событий.** События, входные по отношению к операции ***И***, должны формулироваться так, чтобы второе было условным по отношению к первому, третье условным по отношению к первому и второму, а последнее - условным ко всем предыдущим. Кроме того, по крайней мере, одно из событий должно быть связано с появлением выходного события.



**Правило применения логического знака И.** Если имеются несколько причин, которые должны появиться одновременно, то обычно используют операцию **И**. **Входы операции должны отвечать на вопрос: «Что необходимо для появления выходного события?».**

Логический знак ИЛИ (схема объединения).

**Выходное событие логического знака ИЛИ наступает в том случае, если имеет место любое из входных событий.**

**Правило формулирования событий.** События, входные по отношению к операции **ИЛИ**, должны формулироваться так, чтобы они вместе исчерпывали все возможные пути появления выходного события. Кроме того, любое из входных событий должно приводить к появлению выходного события.

**Правило применения логического знака ИЛИ.** Если любая из причин приводит к появлению выходного события, следует использовать операцию **ИЛИ**. **Входы операции отвечают на вопрос: «Какие события достаточны для появления выходного события?».**

Примеры этих двух логических знаков показаны на рисунке 1.

Событие «**возникновение пожара**» имеет место, если два события – «**утечка горючей жидкости**» **И** «**очаг воспламенения вблизи горючей жидкости**», происходят одновременно.

Последнее (критическое) событие случается, если происходит одно из двух событий – «**наличие искры**» **ИЛИ** «**курящий рабочий**».

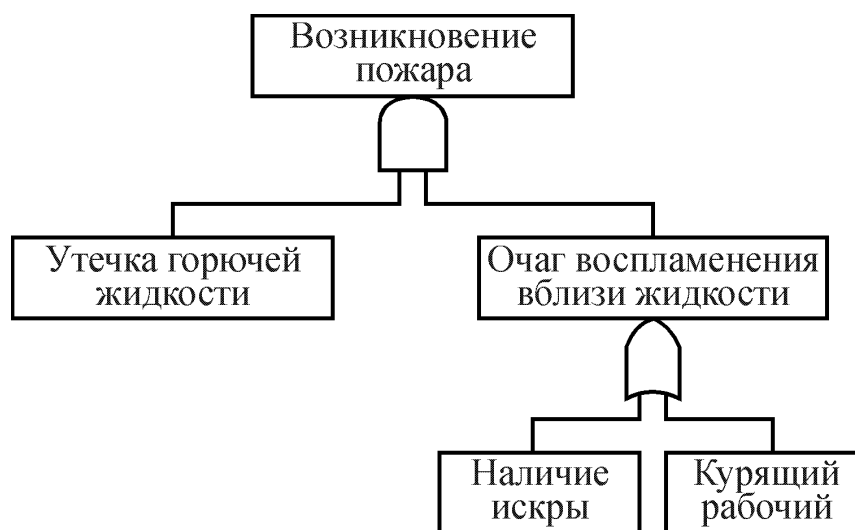
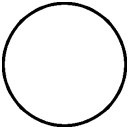
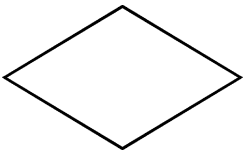

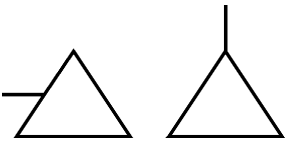


Рисунок 1 - Пример использования логических знаков **И** и **ИЛИ**

Причинные связи, выраженные логическими знаками **И**, **ИЛИ**, являются вполне детерминированными (определёнными, известными, чётко установленными и т.п.), так как появление выходного события полностью определяется входными событиями, как в случае на рисунке 1.

**Символы событий.** Для построения дерева отказов используются символы событий (таблица 2).

Таблица 2 - Символы событий

Символ события	Содержание события*
	Исходное событие, обеспеченное достаточными данными. Например, событие, означающее первичный отказ элемента в системе
	Событие, недостаточно детально разработано, т.к. причины выявлены не полностью. Такое событие может быть в дальнейшем детализировано путем показа вызывающих его первичных событий, и если этого не делается, то, значит, либо отсутствует необходимая информация, либо само событие не представляет особого интереса.
	Результирующее событие - событие, вводимое логическим элементом. Наступает в результате конкретной комбинации событий на входе логической схемы
	Ожидаемое событие, появление которого ожидается, но оно может и не произойти
	Символ перехода на другое дерево отказов или перенос в конкретном дереве отказов, например на другой лист

- Содержание события вписывается в поле символа. Если места недостаточно, символы нумеруются, составляется таблица в строки которой вписывается содержание события

**Круглый блок** обозначает исходный отказ (исходное событие) отдельного элемента (в пределах данной системы или окружающей среды), который определяет, таким образом, разрешающую способность данного дерева отказов.

**Ромбы** используются для обозначения детально не разработанных событий в том смысле, что детальный анализ не доведен до исходных типов отказов в силу отсутствия необходимой информации, средств или времени. Часто такие события не учитываются при количественном анализе. *Они включаются на начальном этапе построе-*

ния дерева отказов, и их присутствие служит показателем глубины и ограничений данного исследования. Но при необходимости их можно разработать. Поэтому их часто используют при построении дерева отказов.

Для того чтобы получить количественные результаты с помощью дерева отказов, круглые блоки должны представлять события, для которых имеются данные по надежности и они называются исходными событиями - первичными отказами. Обычно такое событие обуславливается определенным элементом в системе.

**Прямоугольный блок** обозначает событие отказа, которое возникает в результате элементарных, исходных отказов (событий), соединенных с помощью логических элементов.

**ПРИМЕР** использования основных логических знаков и символов событий для построения дерева отказов представлен на рисунке 2, на котором показаны электрическая схема системы и простое дерево отказов с завершающим событием «отказ двигателя».

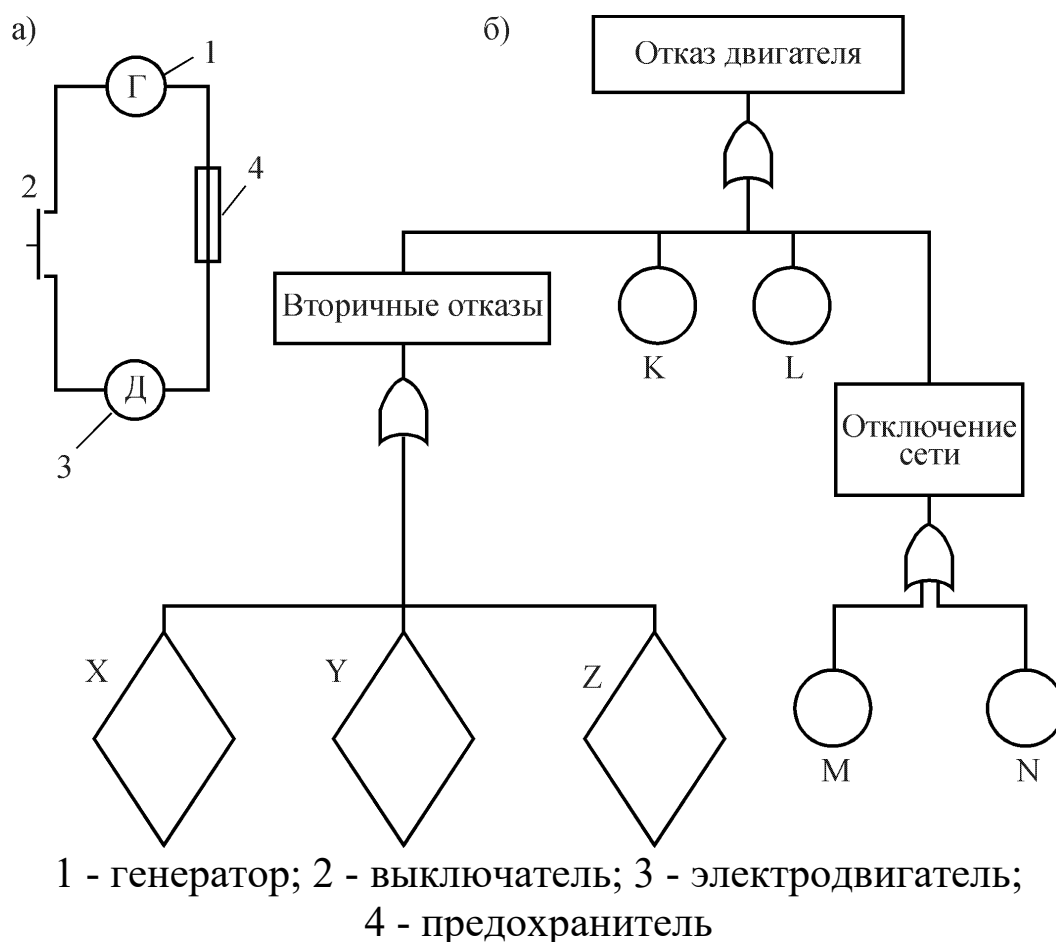


Рисунок 2 - Электрическая схема системы «генератор-двигатель» (а) и дерево отказов (б)

Конечное событие «отказ двигателя» может быть вызвано тремя причинами: *первичный отказ* электродвигателя, *вторичный отказ* и ошибочная команда (*инициированный отказ*).

*Первичный отказ* - это отказ самого двигателя (характеристики которого соответствуют техническим условиям, а также режимы работы также соответствуют техническому регламенту), возникающий в результате естественного старения. Дерево отображает такие первичные события, как отказ выключателя (отсутствие замыкания) *K*, неисправности внутренних цепей обмотки двигателя *L*, сети приемника питания *M* и предохранителя *N*.

*Вторичные отказы* возникают из-за причин, которые лежат за пределами, заданными техническими условиями и режимами эксплуатации, таких как:

- неправильное техническое обслуживание *X* (например, некондиционная смазка подшипников электродвигателя);
- аномальные условия эксплуатации *Y*, это может быть переработка (например, выключатель остался включенным после предыдущего запуска, что вызвало перегрев обмотки электродвигателя, который, в свою очередь, привел к короткому замыканию или обрыву цепи);
- воздействие на условия работы параметров внешней окружающей среды *Z* (например, внешняя катастрофа: пожар, наводнение и т.п.).

Вторичные отказы в этом дереве отказов, вызванные *X*, *Y*, *Z* изображаются прямоугольником, так как это промежуточное событие.

## **5 Построение дерева отказов на основании исследования схемы технической системы (задания)**

Система состоит из таких элементов, как единицы оборудования, материалы, персонал предприятия (необязательно, чтобы эти элементы были самыми мелкими в системе; они могут быть блоками или целыми подсистемами). Каждый элемент системы связан с другими элементами специфическим образом. Назначение и связи элементов описываются технологии. Работая со схемой не следует придумывать какие-либо новые элементы и события, воздействующие на них. Должны рассматриваться только главные, наиболее вероятные или критичные события характерные для данной схемы.

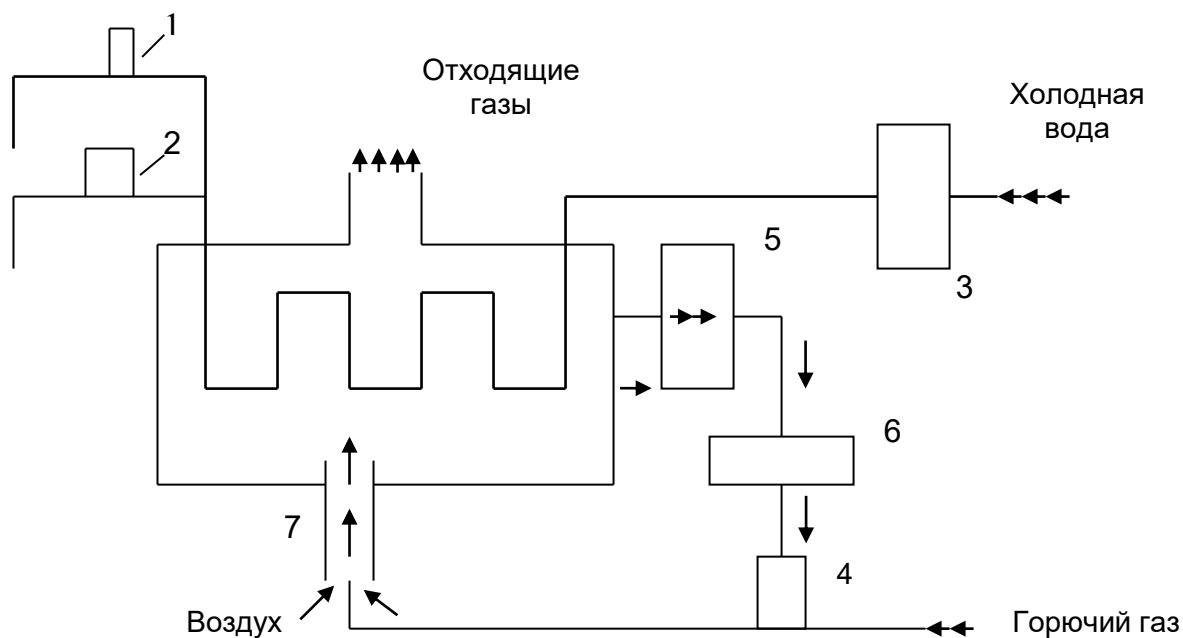
**Задание 1.** Система химического реактора представлена в виде структурной схемы на рисунке 3.



Рисунок 3 - Структурная схема химического реактора

Подача (А) от компрессоров I и II к сушильному агрегату прекратится, если откажут оба компрессора. Построить дерево отказов для завершающего события «нет выхода готового продукта».

**Задание 2.** На рисунке 4 показана схема газового нагревателя воды.



- 1- кран горячей воды (нормально закрыт);  
 2 - предохранительный клапан; 3 - обратный клапан;  
 4 - газовый (запорный) клапан; 5 - устройство измерения и сравнения температуры; 6 - устройство управления; 7-газовая горелка

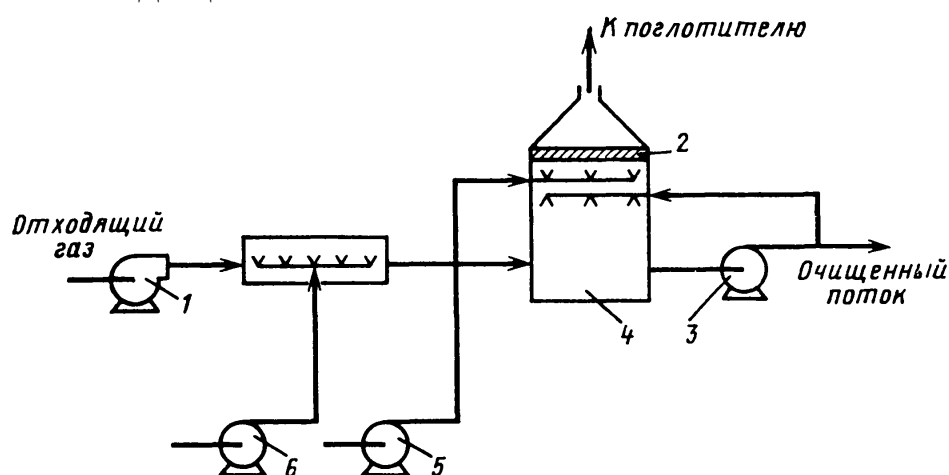
Рисунок 4 - Схема газового нагревателя воды

Газовый клапан 4 включается прибором (устройством управления) 6, который, в свою очередь, управляется с помощью датчика температуры и сравнивающего устройства 5. Газовый клапан управляет главной горелкой 7 в двух режимах: полностью включенном и полностью выключенном (перекрыта подача газа). Обратный клапан 3 на входном трубопроводе холодной воды препятствует обратному потоку при превышении давления в системе горячей воды, а предохранительный клапан 2 открывается, если давление в нагревателе превышает 70 Па. Регулирование температуры осуществляется с помощью прибора 6, который открывает и закрывает главный газовый клапан 4 при выходе температуры за установленные пределы (от 60 до 82 °С).

Конечное нежелательное событие, которое может произойти – **«разрыв водяного бака»** нагревателя из-за перегрева.

Построить дерево отказов для завершающего события **«разрыв водяного бака»**.

**Задание 3.** Построить дерево отказов для системы охлаждения и очистки отходящего газа.

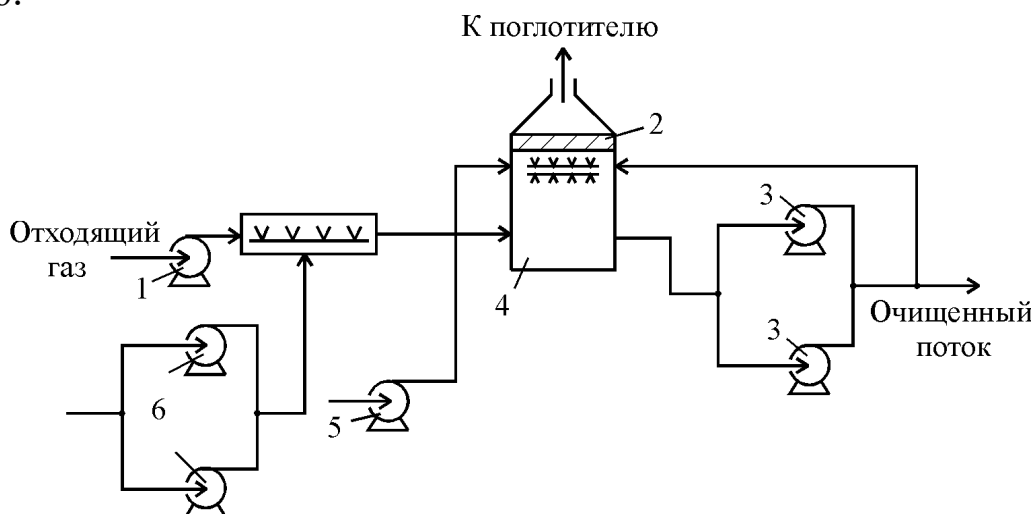


- 1 - нагнетательный вентилятор; 2- сетчатая прокладка;  
 3 - насос выброса очищенного газа; 4 - предварительный газоочиститель, 5 - водяной насос для промывки отходящего газа,  
 6 – насос для подачи охладителя газа

Рисунок 5. Схема системы охлаждения и очистки отходящего газа

При построении дерева отказов следует обратить внимание, что элементы 2 и 4 схемы представляют собой единое устройство - фильтр.

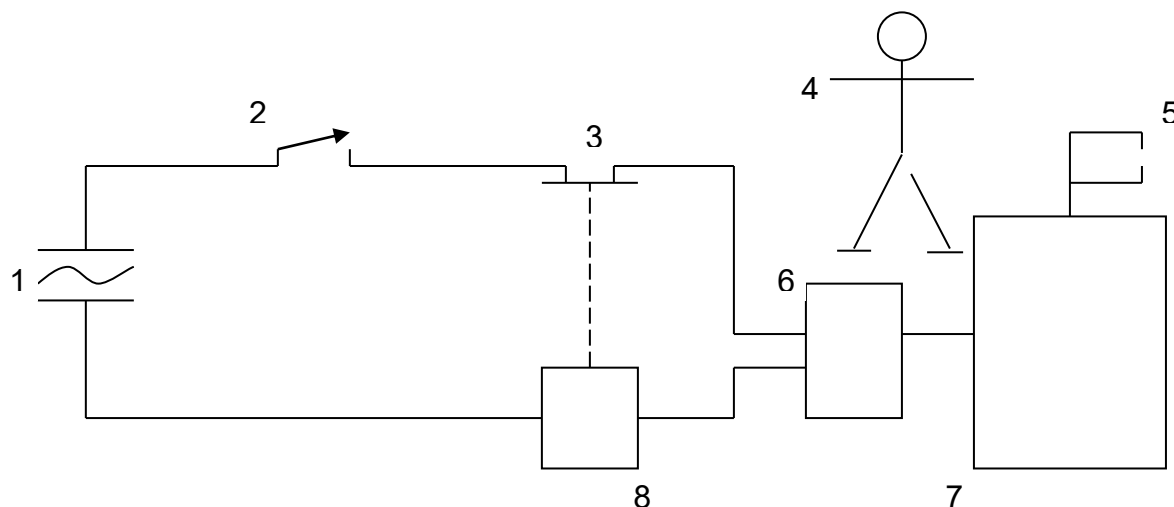
**Задание 4.** Построить дерево отказов для усовершенствованной системы охлаждения и очистки отходящего газа, приведенной на рисунке 6.



1 - нагнетательный вентилятор; 2 - сетчатая прокладка;  
3 - два циркуляционных насоса выброса очищенного газа, работающих по принципу резервирования; 4 - предварительный газоочиститель; 5 - водяной насос для промывки отходящего газа; 6 - два насоса для подачи охладителя газа, работающих по принципу резервирования

Рисунок 6 - Система охлаждения и очистки отходящего газа

**Задание 5.** На рисунке 7 представлена схема наполнения бака с завершающим событием «разрыв бака под давлением»



1 - источник питания; 2 - ручной выключатель; 3 - контакты реле;  
4 - оператор; 5 - сирена; 6 - насос с электроприводом; 7 - бак;  
8 - таймер (реле времени)

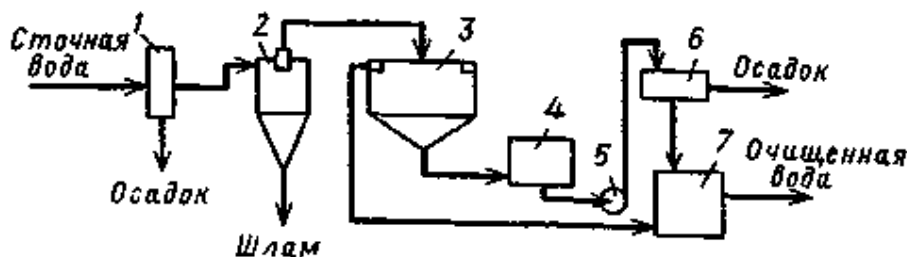
Рисунок 7 - Схема системы наполнения бака

*Объект* - система перекачки.

*Технология.* Оператор 4 включает ручной выключатель 2, тем самым подается напряжение на электропривод насоса 6. Бак 7 заполняется за 10 мин и освобождается за 50 мин. Таким образом, продолжительность одного полного цикла составляет 1 ч. После включения ручного выключателя 2 одновременно с насосом запускается реле времени 8, обеспечивая размыкание контактов 3 через 10 мин. Если эти элементы системы отказывают, то звучит аварийная сирена 5. Тогда оператор выключает ручной выключатель 2 для того, чтобы не допустить разрыв бака из-за его переполнения.

Оператор в данном примере рассматривается как отдельный элемент системы. Первичный отказ оператора означает, что оператор, который должен действовать по инструкции, не выключил выключатель при включении сирены. Вторичный отказ оператора происходит, например, если оператор получил тяжелую травму во время пожара, когда звучала сирена. Ошибочной командой от оператора (инициированный отказ) является событие «невыполнение действия при звучании сирены».

**Задание 6.** Схема системы очистки сточной воды на центрифугах представлена на рисунке 8. Из сточной воды сначала удаляется крупный осадок на решетках, а затем песок в гидроциклоне. После уплотнения осадка его удаляют из центрифуги.



1 - решетка; 2 - гидроциклон; 3 - уплотнитель осадка; 4, 7 - ёмкости; 5 - насос; 6 - центрифуга

Рисунок 8 - Схема установки удаления осадка из сточной воды на центрифуге

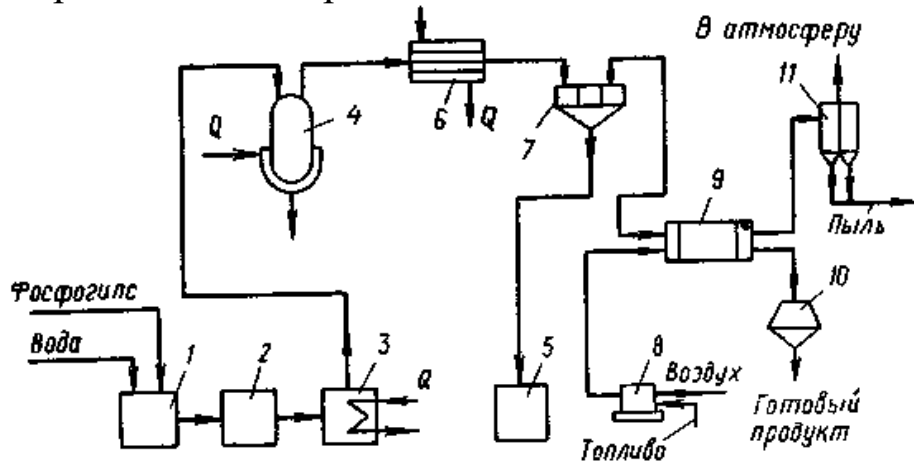
Построить деревья отказов для завершающих событий:

- а) «нет выхода очищенной воды»;
- б) «нет разгрузки осадка».



## 6 Дополнительные задания, для студентов пропускающих аудиторные занятия

**Задание 7.** На рисунке 9 представлена принципиальная схема установки производства строительного гипса из отходов.



1 - смеситель; 2- емкость-накопитель; 3 - расходная емкость; 4 - автоклав; 5 - сборник фильтрата; 6 - теплообменник; 7 - ленточный вакуум-фильтр; 8 - топка; 9 - сушильный барабан; 10 - бункер; 11 - циклон

Рисунок 9 - Схема установки переработки отходов

Построить деревья отказов для завершающих событий:

- «нет выхода готового продукта»;
- «нет разгрузки пыли»;
- «нет выхода очищенного воздуха в атмосферу».

## 7 Контрольные тесты, вопросы и задания

**Тесты.** Задача тестов – проверить усвоение метода построения дерева отказов.

1. «ДО» лежит в основе логико-вероятностной модели...

- изучения поведения ТС в условиях риска внешних воздействий, вызывающих нарушения режима работоспособности ТС;
- причинно-следственных связей отказа системы с отказами ее элементов и воздействиями;
- развития опасной ситуации, приводящей нежелательному завершающему событию, расположенному в вершине «ДО»;
- позволяющей оценить качественно и количественно риск отказа ТС.

2. Анализ «ДО» это...

- набор формальных правил построения последовательностей событий, приводящих к нежелательному исходу;

б) набор формальных правил построения последовательностей событий, позволяющих проследить степень соответствия технической системы заданным требованиям надежности;

в) набор формальных правил построения последовательностей событий, развивающихся во времени и пространстве, приводящих к отказам в технической системе.

**3.** «ДО» при анализе возникновения отказа представляет собой ...

а) многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате численного решения дерева отказов ТС в обратном порядке и качественного описания характеристик опасных ситуаций и отказов элементов;

б) многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке, для того, чтобы отыскать возможные причины их возникновения;

в) многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания в обратном порядке характеристик опасных ситуаций и ограниченную выявлением и анализом тех элементов системы, которые приводят к данному, конкретному виду отказа системы.

**4.** Логические символы (знаки) в «ДО»...

а) связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями;

б) связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями по приоритету появления;

в) связывают события при описании только тех причин, которые вызывают отказ ТС;

г) связывают события при описании только тех причин, которые вызвали отказ следующего уровня «ДО».

**5.** Схема «совпадения» – это логический знак

а) «И» б) «ИЛИ» в) «прямоугольник» г) «исключающее ИЛИ» д) «ромб» е) «приоритетное И» ж) «m из n»

**6.** Какое событие в «ДО» подвергают дальнейшему анализу?

а) вызванное воздействием персонала б) результирующее в) базовое г) непредвиденное д) вызванное действием соседних элементов е) промежуточное

### **Вопросы и задания**

1. Для каких целей выполняется построение дерева отказов?

2. Какая информация необходима для построения дерева отказов?

3. Перечислите основные этапы построения дерева отказов.

4. Каким методом в данной практической работе выполнялось построение дерева отказов?

5. Сформулируйте правило применения логического знака **ИЛИ**.

6. Сформулируйте правило применения логического знака **И**.

6. В каком порядке производится построение дерева отказов?

10. Сформулируйте определение: «Дерево отказов - это ...»
11. Сколько состояний поведения элемента учитывает дерево отказов?
12. Чем представлена вершина дерева отказа?
13. Какую последовательность выявления условий возникновения конкретных нежелательных событий для построения дерева отказов?
14. В чем заключается разработка дерева отказов в обратном порядке?
15. В чем состоит разработка дерева отказов в прямом порядке?
16. Чем является результирующее событие в дереве отказов?
17. Что относится к промежуточным событиям в дереве отказов?
18. Что является базовым событием в дереве отказов?

### Список источников информации

1. ГОСТ Р 27.302-2009. Анализ дерева неисправностей. - М.: Стандартинформ, 2011. - 22 с.
2. ГОСТ Р 51901.13-2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей: Fault Tree Analysis (FTA). - М.: Стандартинформ, 2005. - 13 с.
3. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / под ред. М. И. Фалеева. - М.: Деловой экспресс, 2002. - 368 с.
4. Томаков В.И. Прогнозирование техногенного риска с помощью «Деревьев отказов»: учебное пособие. - Курск, 1997. - 99 с.

### Содержание

Общие положения о выполнении практической работы.....	3
Введение.....	4
1 Структура и свойства дерева отказов.....	6
2 Рассматриваемые события в дереве отказов .....	8
3 Процедура построения дерева отказов	9
4 Символьное представление дерева отказов	11
5 Построение дерева отказов на основании исследования схемы технической системы (задания).....	16
6 Дополнительные задания, для студентов пропускающих аудиторные занятия.....	21
7 Контрольные тесты, вопросы и задания.....	21
Список источников информации.....	23

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



О. Г. Локтионова

*Локтионова* 2017 г.

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА  
ДЕРЕВЬЕВ ОТКАЗОВ**

Методические указания для выполнения  
практической работы по дисциплине  
«Надёжность технических систем и техногенный риск»  
для студентов, обучающихся по направлению  
«Техносферная безопасность»

Курск 2017

УДК 658.34:621.3

Составители: В. И. Томаков, М. В. Томаков

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *А.В. Беседин*

**Количественная оценка деревьев отказов** : методические указания для выполнения практической работы по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск» для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В. И. Томаков, М. В. Томаков. – Курск, 2017. – 28 с.

Изучается аналитический метод количественной оценки дерева отказов. Метод используется для расчета вероятности появления завершающего события в дереве отказов на основе знания частот или вероятностей исходных событий.

При выполнении практической работы у обучающихся формируются компетенции: способностью оценивать риск и определять меры по обеспечению безопасности разрабатываемой техники (ПК-3); способностью использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности (ПК-4).

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 27.01.2017 г. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,7. Уч. изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 54. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет  
305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## **1 Общие положения о выполнении практической работы**

### **Цели практической работы:**

- изучить методику количественной оценки наступления завершающего события в дереве отказов;
- приобретение теоретических знаний и практических навыков, необходимых для количественной оценки дерева отказов и способности оценивать техногенный риск, определять меры по обеспечению безопасности разрабатываемой техники.

### **Указания к выполнению практической работы**

Законспектируйте содержание основных теоретических положений порядка количественной оценки дерева отказов, основные понятия о случайных событиях, а также необходимые для вычисления теоремы сложения и умножения вероятностей случайных событий.

Выполните задания по вариантам.

Ответьте письменно на вопросы и задания по указанию преподавателя.

### **Отчет о выполненной работе**

1. Конспект, включающий:

- основные теоретические положения и процедуру количественной оценки дерева отказов;
- основные понятия о случайных событиях;
- необходимые для вычисления аналитические выражения из теорем сложения и умножения вероятностей случайных событий.

2. Необходимые схемы и выполненные вычисления по вариантам.

3. Письменные ответы на контрольные вопросы и задания.

Работа должна быть выполнена собственноручно.

Отчет следует предоставить на сброшюрованных листах формата А4 или в отдельной ученической тетради.

Схемы следует выполнять, используя чертежные шаблоны или инструменты.

## 2 Процедура количественной оценки дерева отказов

Количественная оценка дерева отказов (ДО) необходима для разработки и сопоставления принимаемых решений по обеспечению надежности и безопасности функционирования технической системы.

Количественная оценка дерева отказов осуществляется либо с помощью статистического моделирования, либо аналитическим методом. В настоящей практической работе изучается аналитический метод. В аналитическом методе используются существующие аналитические выражения для определения вероятности наступления головного события  $P$  (завершающего события). Этот метод определения вероятности завершающего события  $P$  состоит в использовании вероятностей, приписываемых концам ветвей дерева отказов.

Количественная оценка для завершающего события в дереве отказов производится на основании информации о таких количественных показателях надежности, как вероятность отказа, частота или интенсивность отказов. Вначале вычисляют показатели надежности элемента (или используют справочные данные), затем находят критический путь и, наконец, оценивают завершающее событие.

Процедура количественной оценки для завершающего события в дереве отказов:

- представление в графическом виде всего дерева отказов;
- составление перечня отказов и других элементарных событий, приводящих к завершающему событию;
- задание показателей надежности для элементарных событий;
- вычисление требуемых конечных результатов.

Выходной эффект может быть искажен, если при анализе будут использованы ненадежные исходные данные. Поэтому, при проведении анализа надо обладать достаточно надёжной базой исходных событий, хорошим знанием производства, физических процессов, уметь критически оценивать каждое принимаемое значение или допущение, чтобы численные значения вероятности при ветвях дерева были надёжными.

Прежде чем находить количественные показатели надежности, следует упрощать дерево отказов, иначе будет усложнена процедура вычисления или будут получены ошибочные количественные оценки.

## **3 Вероятностная оценка дерева отказов**

### **3.1 Основные понятия о случайных событиях**

Прежде всего, целесообразно остановиться на основных понятиях теории вероятностей применительно к логическим схемам, которыми являются деревья отказов.

Отказы в системах возникают под воздействием разнообразных факторов. Поскольку каждый фактор в свою очередь зависит от многих причин, то отказы элементов, входящих в состав системы, относятся, как правило, к случайным событиям, а время работы до возникновения отказов - к случайным величинам. В инженерной практике возможны и не случайные (детерминированные) отказы (отказы, возникновение которых происходит в определенный момент времени, т.е. в момент возникновения причины (т.е. обусловлены причиной) так как существует однозначная и определенная связь между причиной отказа и моментом его возникновения). Например, если в цепи аппаратов ошибочно поставлен элемент, не способный работать при пиковой нагрузке, то всякий раз, когда возникает эта нагрузка, он обязательно перейдет в состояние отказа. Такие отказы выявляются и устраняются в процессе проверки технической документации и испытаний.

При анализе надежности дерева отказов объектом исследования являются случайные события и величины.

Случайное событие - событие, которое в результате опыта может произойти или не произойти.

Достоверное событие - такое событие, которое непременно должно произойти.

Невозможное событие - такое событие, которое заведомо не может произойти.

Совместные события - такие события, появление одного из которых не исключает возможности появления другого.

Несовместные события - такие события, появление одного из которых исключает возможности появления другого.

Зависимые события - такие события, появление одного из которых влияет на появление другого события.

Независимые события - такие события, появление одного из которых не влияет на появление другого события.



### 3.2 Теоремы сложения и умножения вероятностей случайных событий

Теорема сложения вероятностей несовместных событий. Вероятность появления одного из двух несовместных событий, безразлично какого, равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A + B) = P(A) + P(B). \quad (1)$$

Следствие. Вероятность появления одного из нескольких попарно несовместных событий, безразлично какого, равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n). \quad (2)$$

Теорема сложения вероятностей совместных событий. Вероятность появления хотя бы одного из двух совместных событий равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного появления (**соответствует знак ИЛИ**):

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (3)$$

Это выражение можно записать как

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(A_i)). \quad (3.1)$$

Теорема может быть обобщена на любое конечное число совместных событий. Например, для трех совместных событий:

$$P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(AB) - P(AC) - P(BC) + P(ABC). \quad (4)$$

Однако, при числе событий более трех выражение (4) приобретает громоздкую запись и неудобно для вычисления. В этом случае рекомендуется использовать выражение (3.1).

Теорема умножения вероятностей независимых событий. Вероятность совместного появления двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий (**соответствует знак И**):

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B). \quad (5)$$

Следствие. Вероятность появления нескольких событий, независимых в совокупности, равна произведению вероятности этих событий:

$$P(A_1 A_2 \cdot \dots \cdot A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_n). \quad (6)$$

Используя теорему умножения вероятностей, данное выражение можно представить:

$$P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (6.1)$$

Теорема умножения вероятностей зависимых, событий. Вероятность совместного появления двух зависимых событий равна произведению одного из них на условную вероятность второго:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B); P(AB) = P(B) \cdot P_B(A). \quad (7)$$

Следствие. Вероятность совместного появления нескольких зависимых событий равна произведению вероятности одного из них на условные вероятности всех остальных, причем вероятности каждого последующего события вычисляются в предположении, что все предыдущие события уже появились:

$$P(A_1 A_2 A_3 \cdot \dots \cdot A_n) = P(A_1) \cdot P_{A_1}(A_2) \cdot P_{A_1 A_2}(A_3) \cdot \dots \cdot P_{A_1 A_2 \dots A_{n-1}}(A_n) \quad (8)$$

где  $P_{A_1 A_2 \dots A_{n-1}}$  - вероятность события  $A_n$ , вычисленная в предположении, что события  $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}$  наступили.

### 3.3 Аналитическое описание простых схем

Для того, чтобы дерево отказов отвечало своему назначению, в нём используют схемы, показывающие логические связи между отказами элементов системы и завершающим событием. Для представления этих логических схем в математической форме применяются основные законы булевой алгебры.

Схема **ИЛИ** изображается символом  $\cup$  или «+». Любой из этих символов показывает объединение событий, связанных со схемой **ИЛИ**.

Описание схемы **ИЛИ** с двумя событиями на входе дано на рисунке 1.

Событие  $V_0$  на выходе схемы **ИЛИ** записывается в булевой алгебре как

$$V_0 = V_1 + V_2,$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – события на входе.

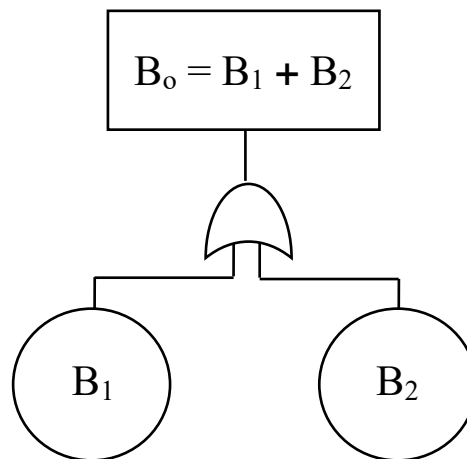


Рисунок 1 - Схема **ИЛИ** с двумя входами

Схема **И** изображается символом  $\cap$  или «•». Любой из этих символов показывает пересечение событий, связанных со схемой **И**.

Описание схемы **И** с двумя событиями на входе показано на рисунке 2.

Событие  $V_0$  на выходе схемы **И** записывается в булевой алгебре как

$$V_0 = V_1 \cdot V_2,$$

где  $V_1$  и  $V_2$  - события на входе.

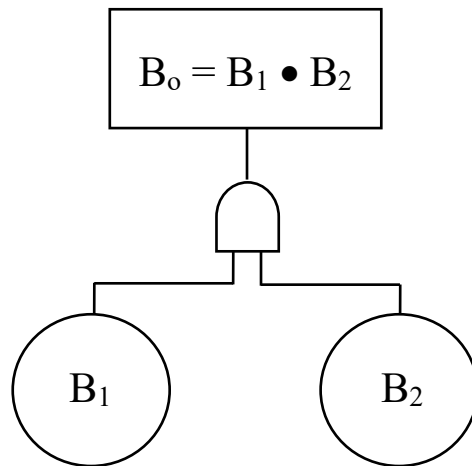
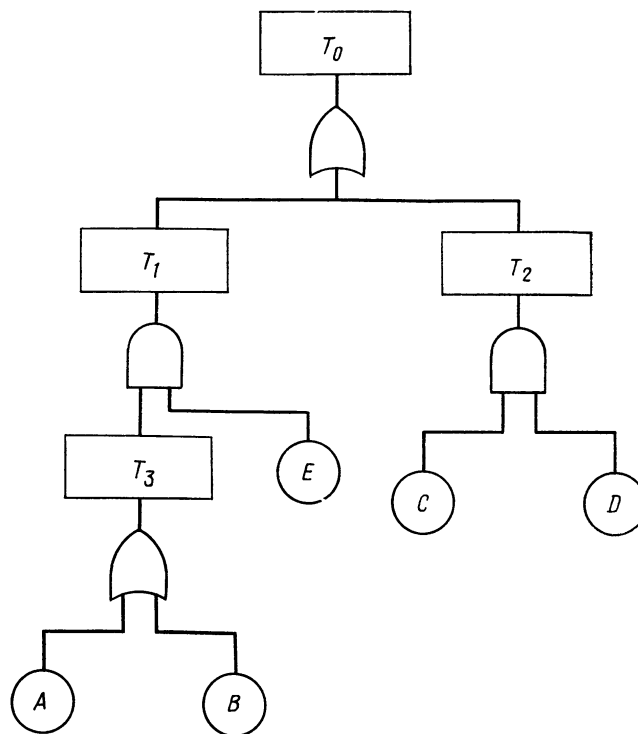


Рисунок 2 - Схема **И** с двумя входами

Для пояснения вероятностного аспекта работы схемы «ИЛИ» и схемы «И», нахождения вероятности наступления завершающего события рассмотрим примеры.

**Пример.** Требуется вычислить вероятность появления завершающего события дерева отказов, изображенного на рисунке 3.



$A, B, C, D, E$  - основные (исходные) события;  
 $T_1, T_2, T_3$  - промежуточные события;  $T_0$  - завершающее событие

Рисунок 3 - Дерево отказов

Допустим, что основные (исходные) события  $A, B, C, D$  и  $E$  статистически независимы и что  $P(A)=P(B)=P(C)=P(D)=P(E)=1/4$ . В данном случае дерево не содержит повторяющихся элементарных событий, поэтому можно использовать метод определения численного значения вероятности появления завершающего события, который основан на вычислении вероятностей появления промежуточных событий. В данном случае предполагается, что начальные события (отказы) между собой статистически независимы.

Вычисления производим «снизу - вверх», т.е. вначале вычисляем значения промежуточных событий самого нижнего уровня дерева ( $T_3$ ), затем события вышележащего уровня ( $T_1$ ) и ( $T_2$ ), а затем определяем вероятность наступления завершающего события ( $T_0$ ) - верхний уровень или вершина графа.

Используя правило сложения вероятностей совместных событий (3) и правило умножения вероятностей независимых событий (5), получаем следующие количественные результаты для вероятностей появления промежуточных событий и завершающего события:

$$P(T_3) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B) = 1/4 + 1/4 - 1/16 = 7/16,$$

$$P(T_2) = P(C) \cdot P(D) = 1/4 \cdot 1/4 = 1/16,$$

$$P(T_1) = P(T_3) \cdot P(E) = 7/16 \cdot 1/4 = 7/64,$$

$$P(T_0) = P(T_1) + P(T_2) - P(T_1) \cdot P(T_2) = 7/64 + 1/16 - 7/64 \cdot 1/16 = 169/1024.$$

Ответ: вероятность появления завершающего события  $P(T_0)$  равна  $169/1024$ .

#### 4 Практическая часть

**Задание 1.** Решите задачу по вариантам (таблица 1), для дерева отказов из разобранного примера (рисунок 3), применив метод, рассмотренный в этом примере.

Таблица 1 - Варианты значений исходных событий

Индекс события	Значения исходных событий по вариантам (номер по списку группы)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>A</i>	0,1	0,2	0,05	0,3	0,06	0,09	0,09	0,25	0,2	0,1
<i>B</i>	0,2	0,3	0,15	0,05	0,2	0,02	0,1	0,05	0,02	0,02
<i>C</i>	0,03	0,09	0,08	0,2	0,025	0,15	0,025	0,15	0,25	0,1
<i>D</i>	0,25	0,25	0,25	0,15	0,25	0,3	0,1	0,25	0,15	0,3
<i>E</i>	0,05	0,04	0,03	0,3	0,05	0,2	0,08	0,07	0,1	0,2

**Задание 2.** Решите задачу по вариантам (таблица 1), для дерева отказов, приведенного на рисунке 4, применив метод, рассмотренный в примере.

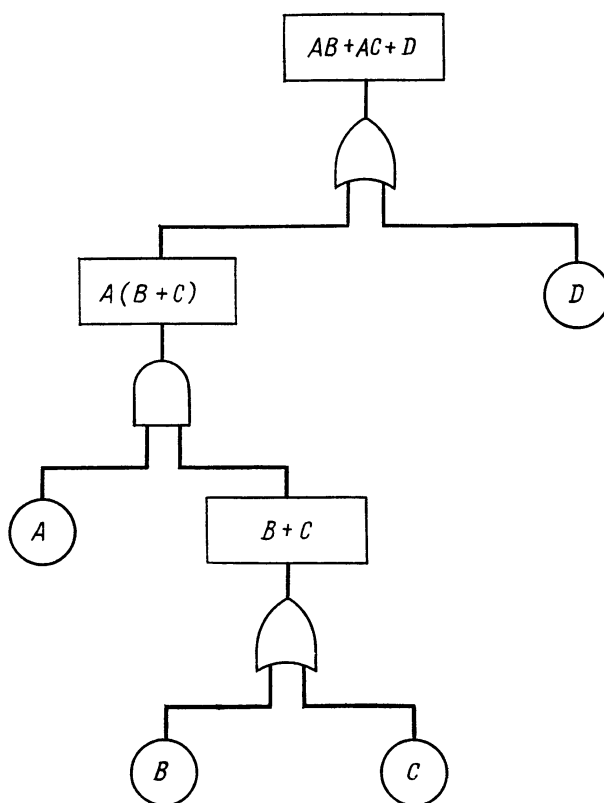


Рисунок 4 - Дерево отказов для задания 2

**Задание 3.** Требуется вычислить вероятность появления завершающего события дерева отказов, изображенного на рисунке 5.

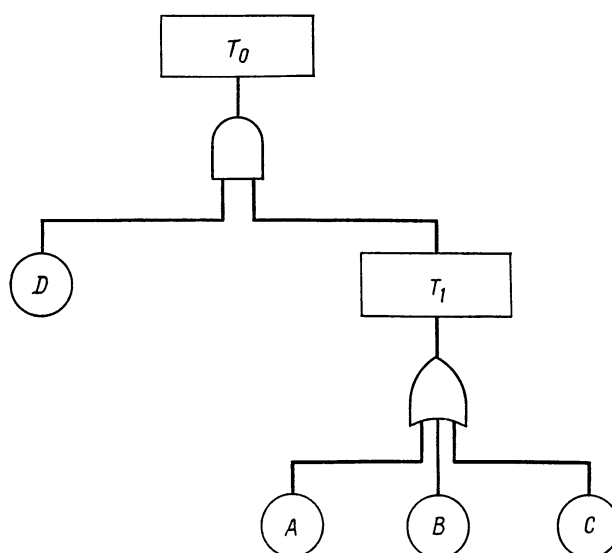


Рисунок 5 - Дерево отказов для задания 3

Так же, как в ранее рассмотренном примере, основные (исходные) события  $A, B, C, D$  статистически независимы. Вероятности исходных событий составляют:  $P(A) = P(B) = P(C) = P(D) = 0,05$ .

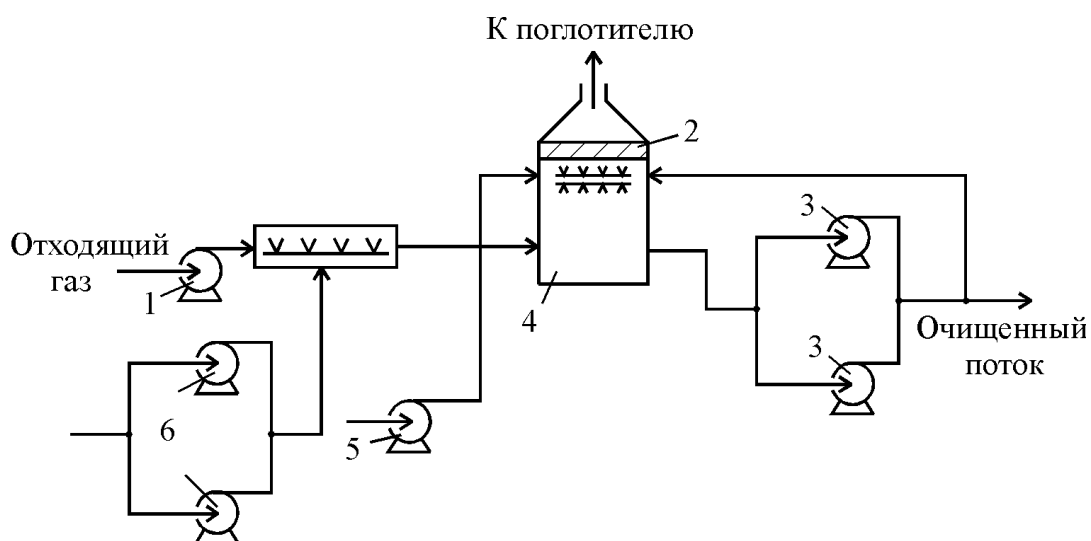
Вычисление производите по двум вариантам.

1. Для вычисления знака **ИЛИ** используйте (3), а для вычисления **И** используйте (6).

2. Для вычисления знака **ИЛИ** используйте (3.1), а для вычисления **И** используйте (6.1).

Сравните результаты и вычислите расхождение.

**Задание 4.** На рисунке 6 приведена схема системы охлаждения и очистки отработавшего газа.



- 1 - нагнетательный вентилятор ( $C$ ); 2 - сетчатая прокладка;  
 3 - два циркуляционных насоса предварительной очистки газа ( $F, G$ ),  
 работающие по принципу резервирования;  
 4 - предварительный газоочиститель ( $H$ ); 5 - водяной насос ( $E$ );  
 6 - два охлаждающих насоса ( $A, B$ ),  
 работающие по принципу резервирования

Рисунок 6 - Система охлаждения и очистки отходящего газа

Соответствующее дерево отказов приведено на рисунке 7. Требуется вычислить вероятность появления завершающего события дерева отказов, изображенного на этом рисунке по вариантам (таблица 2).

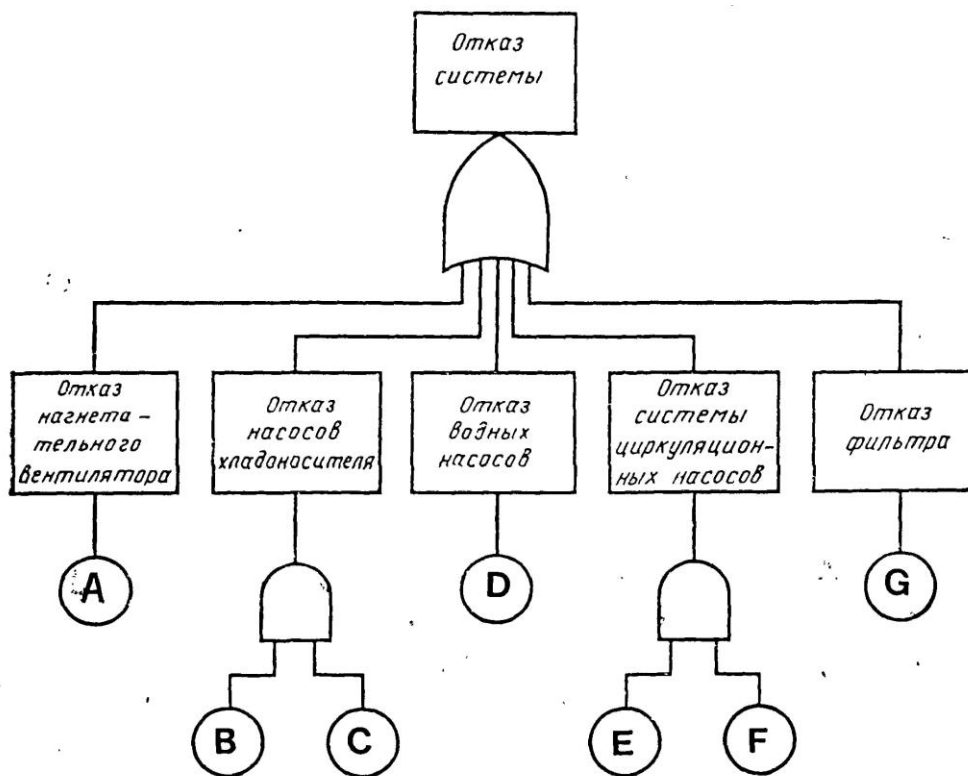


Рисунок 7 - Дерево отказов системы охлаждения и очистки отходящего газа с исходными событиями (*A, B, C, D, E, F, G*)

Таблица 2 - Варианты значений исходных событий для задания 4

Индекс события	Значения исходных событий по вариантам (номер по списку группы)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>A</i>	0,1	0,2	0,05	0,03	0,06	0,09	0,09	0,25	0,02	0,1
<i>B</i>	0,2	0,3	0,15	0,05	0,2	0,2	0,1	0,05	0,2	0,2
<i>C</i>	0,3	0,09	0,08	0,2	0,25	0,15	0,25	0,15	0,05	0,1
<i>D</i>	0,05	0,025	0,2	0,15	0,15	0,1	0,1	0,05	0,15	0,03
<i>E</i>	0,05	0,04	0,03	0,3	0,05	0,2	0,08	0,07	0,1	0,2
<i>F</i>	0,15	0,25	0,15	0,25	0,1	0,2	0,3	0,15	0,05	0,25
<i>G</i>	0,03	0,09	0,08	0,02	0,025	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05



**Задание 5.** Система химического реактора представлена в виде структурной схемы на рисунке 8, а дерево отказов - на рисунке 9.

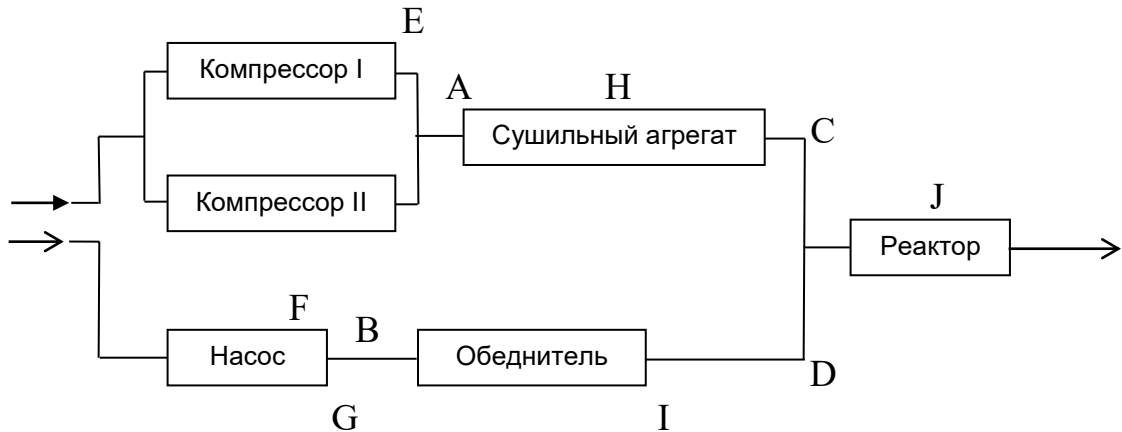


Рисунок 8 - Структурная схема химического реактора

На схеме показаны состояния: *A* - подача от компрессора к сушильному агрегату; *B* - подача от насоса к обеднителю; *C* - подача от сушильного агрегата к реактору; *D* - подача от обеднителя к реактору; *E* - внутреннее состояние компрессора I; *F* - внутреннее состояние компрессора II; *G* - внутреннее состояние насоса; *H* - внутреннее состояние сушильного агрегата; *I* - внутреннее состояние обеднителя; *J* - внутреннее состояние реактора.

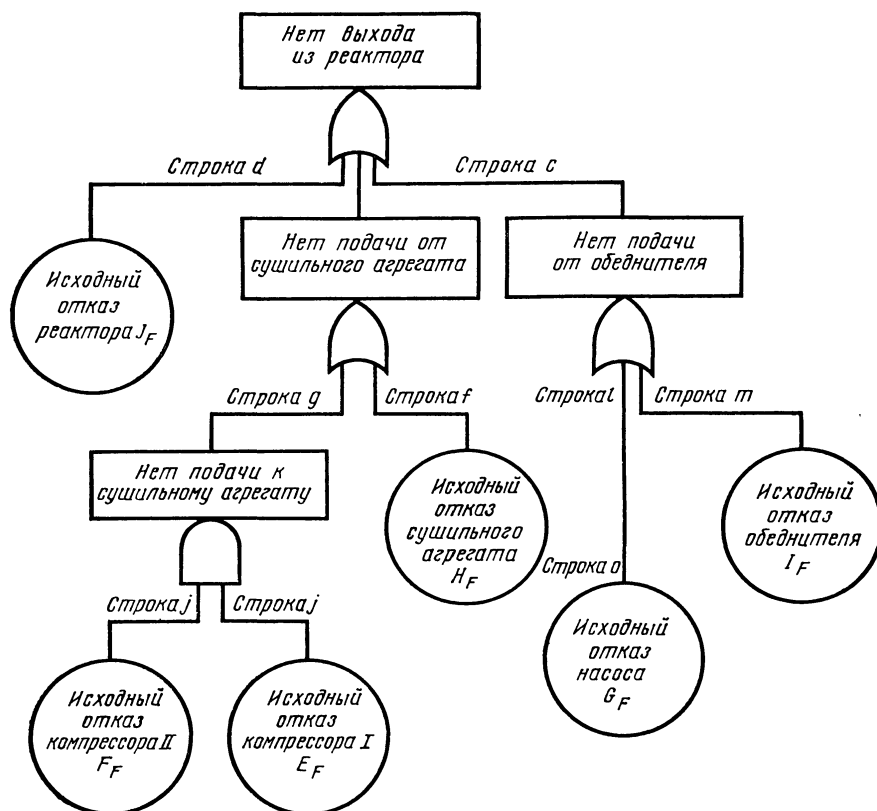


Рисунок 9 - Дерево отказов для химического реактора

Требуется вычислить вероятность появления завершающего события дерева отказов, изображенного на этом рисунке по вариантам (таблица 3). Присвойте индексы промежуточным и завершающему событиям.

Таблица 3 - Варианты значений исходных событий для задания 5

Индекс события	Значения исходных событий по вариантам (номер по списку группы)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$J_F$	0,03	0,09	0,08	0,02	0,025	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05
$E_F$	0,2	0,3	0,15	0,05	0,2	0,2	0,1	0,05	0,2	0,2
$F_F$	0,3	0,09	0,08	0,2	0,25	0,15	0,25	0,15	0,25	0,1
$H_F$	0,25	0,25	0,25	0,15	0,25	0,3	0,1	0,25	0,15	0,3
$G_F$	0,05	0,04	0,03	0,3	0,05	0,2	0,08	0,07	0,1	0,02
$I_F$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01	0,02	0,03	0,015	0,05	0,025

**Задание 6.** Дерево отказов, показанное на рисунке 10, относится к системе выбора, которая вырабатывает выходной сигнал, если более чем  $m$  элементов вырабатывают командный сигнал. Обычно система выбора типа « $m$  из  $n$ » находит применение в системах безопасности, где желательно избежать дорогостоящих остановок, вызываемых ложными сигналами от предохранительного контрольного прибора. Выключение системы происходит, когда **два из трех** предохранительных контрольных приборов вырабатывают сигналы на выключение. Итоговое дерево отказов показано на рисунке 11, оно является частным случаем дерева, изображенного на рисунке 10.

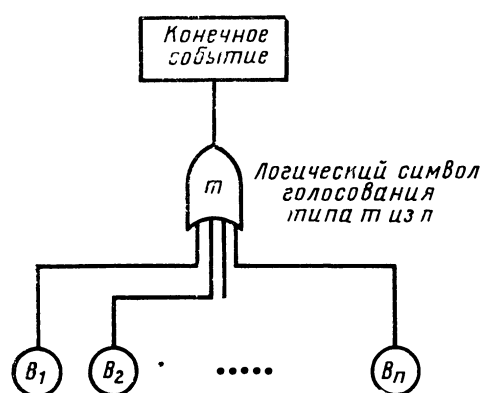


Рисунок 10 - Система выбора типа « $m$  из  $n$ »

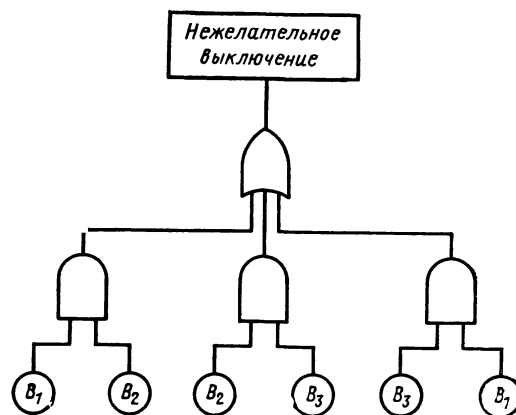


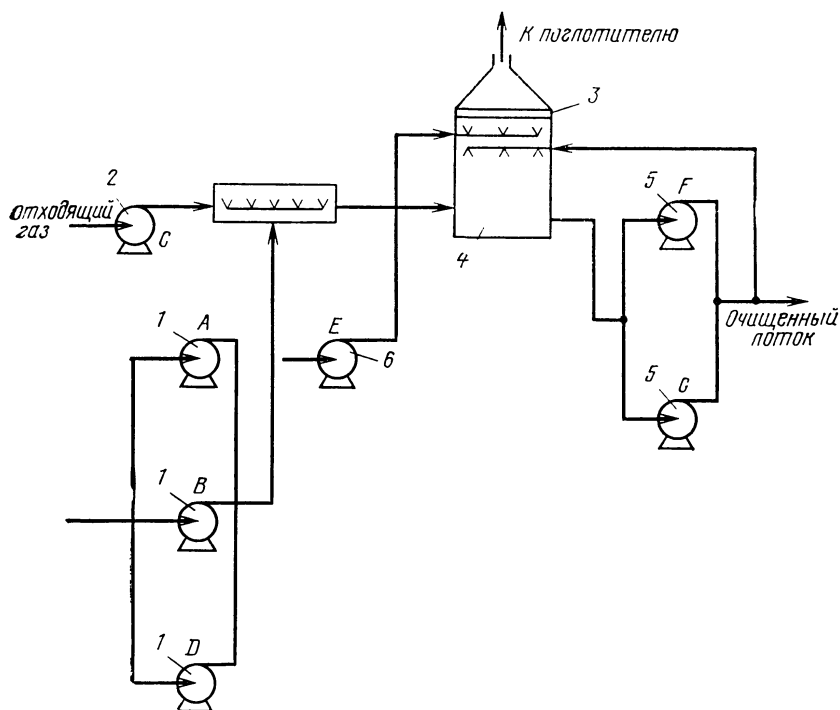
Рисунок 11 - Дерево отказов системы выключения типа «два из трех» ( $B_i$  - ложный сигнал от прибора  $i$ )

Требуется вычислить вероятность появления завершающего события ДО, изображенного на рисунке 11 по вариантам (таблица 4).

Таблица 4 - Варианты значений исходных событий для задания 6

Индекс события	Значения исходных событий по вариантам (номер по списку группы)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B_1$	0,3	0,09	0,08	0,2	0,25	0,05	0,04	0,03	0,3	0,05
$B_2$	0,2	0,3	0,15	0,05	0,2	0,2	0,1	0,05	0,2	0,2
$B_3$	0,3	0,09	0,08	0,2	0,25	0,15	0,25	0,15	0,25	0,1
Индекс события	Значения исходных событий по вариантам (номер по списку группы)									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$B_1$	0,25	0,25	0,25	0,15	0,25	0,3	0,1	0,25	0,15	0,3
$B_2$	0,05	0,04	0,03	0,3	0,05	0,2	0,08	0,07	0,1	0,2
$B_3$	0,15	0,25	0,15	0,25	0,1	0,2	0,3	0,15	0,05	0,25

**Задание 7.** На рисунке 12 приведена схема системы охлаждения и очистки отработавшего газа в которой для повышения надёжности имеется резервирование с двумя элементами - насосами (1), построенное по типу «два из трех». Дерево отказов для этой системы приведено на рисунке 13.



1 - охлаждающие насосы; 2 - вспомогательный вентилятор; 3 - сетчатый фильтр; 4 - предварительный газоочиститель; 5 - два циркуляционных насоса предварительного газоочистителя; 6 - питательный (водяной) насос

Рисунок 12 - Система охлаждения и очистки отработавшего газа с охлаждающими насосами, построенная по принципу «два из трех»

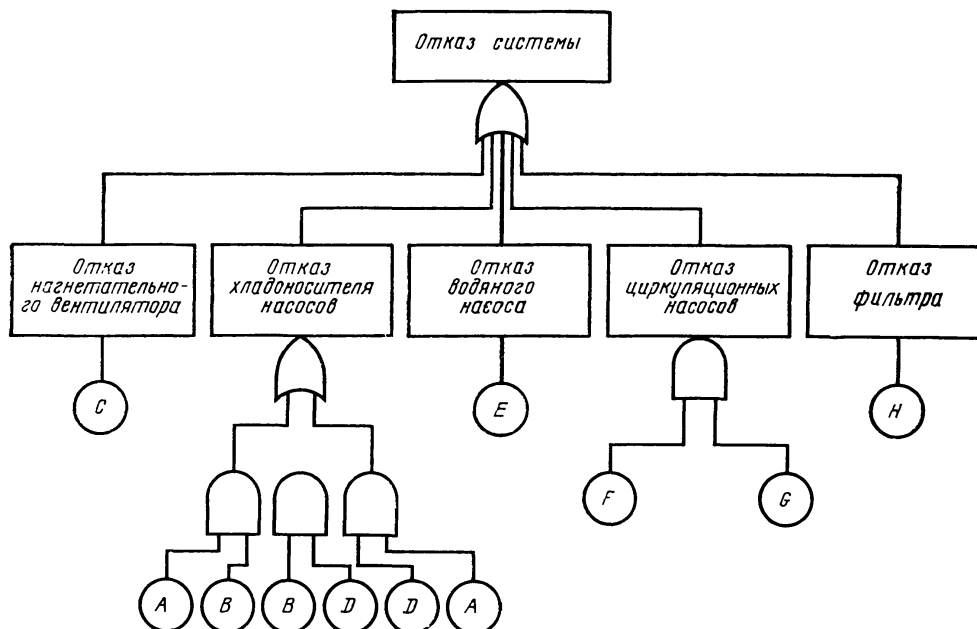


Рисунок 13 - Дерево отказов для системы охлаждения и очистки отработавшего газа

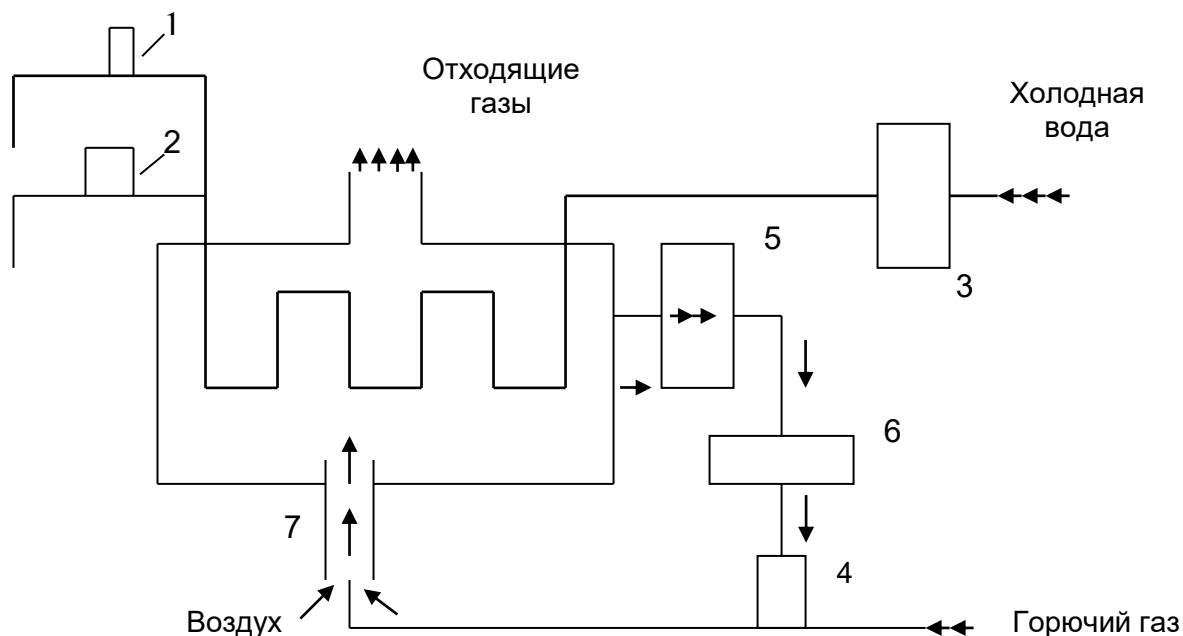
Требуется вычислить вероятность появления завершающего события дерева отказов по вариантам (таблица 5).

Таблица 5 - Варианты значений исходных событий для задания 7

Индекс события	Значения исходных событий по вариантам (номер по списку группы)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0,02	0,03	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02
B	0,2	0,3	0,15	0,05	0,2	0,2	0,1	0,05	0,2	0,2
D	0,02	0,03	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02
E	0,07	0,09	0,08	0,08	0,05	0,05	0,05	0,15	0,05	0,1
F	0,25	0,25	0,25	0,15	0,25	0,3	0,1	0,25	0,15	0,3
H	0,05	0,04	0,03	0,3	0,05	0,2	0,08	0,07	0,1	0,2
G	0,15	0,25	0,15	0,25	0,1	0,2	0,3	0,15	0,05	0,25
C	0,25	0,25	0,25	0,15	0,25	0,3	0,1	0,25	0,15	0,3
Индекс события	Значения исходных событий по вариантам (номер по списку группы)									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	0,25	0,25	0,25	0,15	0,25	0,3	0,1	0,25	0,15	0,3
B	0,25	0,25	0,25	0,15	0,25	0,3	0,1	0,25	0,15	0,3
D	0,25	0,25	0,25	0,15	0,25	0,3	0,1	0,25	0,15	0,3
E	0,05	0,04	0,03	0,3	0,05	0,2	0,08	0,07	0,1	0,2
F	0,15	0,25	0,15	0,25	0,1	0,2	0,3	0,15	0,05	0,25
H	0,02	0,03	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02
G	0,08	0,2	0,25	0,04	0,03	0,2	0,1	0,05	0,2	0,2
C	0,03	0,015	0,05	0,025	0,015	0,025	0,02	0,02	0,01	0,09

Для упрощения расчетов принято допущение, что одновременно в ремонте может находиться только один насос, и что каждый насос имеет одинаковую вероятность отказа, когда работает и когда находится в резерве.

**Задание 8.** На рисунке 14 показана схема газового нагревателя воды. Найти вероятность завершающего события для дерева отказов, представленного на рисунке 15.



- 1 - кран горячей воды (нормально закрыт);  
 2 - предохранительный клапан; 3 - обратный клапан;  
 4 - газовый (запорный) клапан; 5 - устройство измерения и сравнения температуры; 6 - устройство управления; 7 - газовая горелка

Рисунок 14 - Схема газового нагревателя воды

Газовый клапан 4 включается прибором (устройством управления) 6, который, в свою очередь, управляется с помощью датчика температуры и сравнивающего устройства 5. Газовый клапан управляет главной горелкой 7 в двух режимах: полностью включенном и полностью выключенном (перекрыта подача газа). Обратный клапан 3 на входном трубопроводе холодной воды препятствует обратному потоку при превышении давления в системе горячей воды, а предохранительный клапан 2 открывается, если давление в нагревателе превышает 70 Па. Регулирование температуры осуществляется с помощью прибора 6, который открывает и закрывает главный газовый клапан 4 при выходе температуры за установленные пределы (от 60 до 82 °С).



## 5 Дополнительные задания для студентов, пропускающих аудиторные занятия

**Задание 9.** На рисунке 16 представлено дерево отказов с конечным событием «отказ запуска электродвигателя» для схемы, приведенной на рисунке 17. Следует количественно оценить вероятность наступления завершающего события, используя данные таблицы 6.

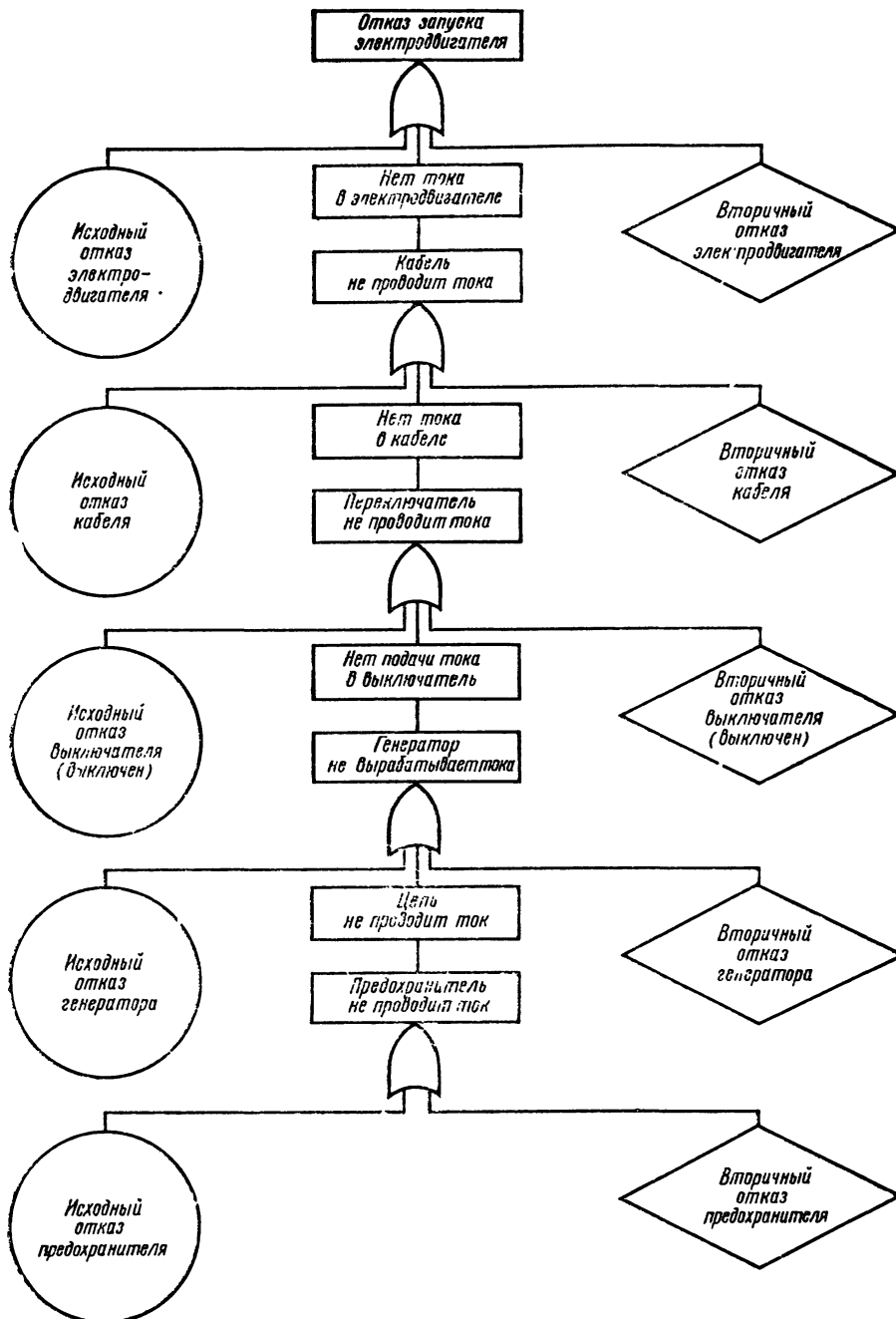
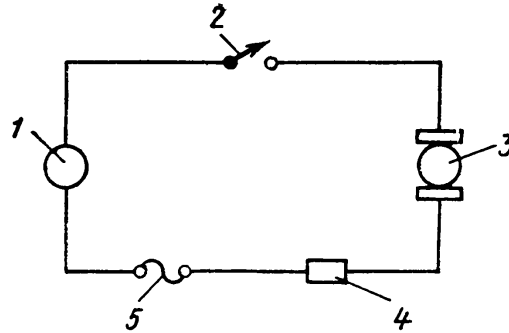


Рисунок 16 - Дерево отказов с конечным событием «отказ запуска электродвигателя»



1 - генератор; 2 - переключатель; 3 - электродвигатель; 4 - кабель;  
5 - предохранитель

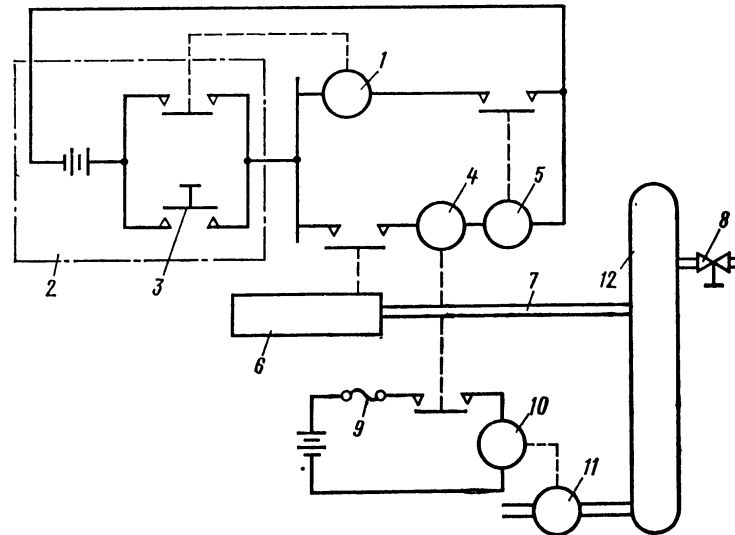
Рисунок 17 - Электрическая схема системы  
«генератор - электродвигатель»

Таблица 6 - Варианты значений исходных событий

Наименование исходного отказа	Значения исходных событий по вариантам (номер по списку группы)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Исходный отказ электродвигателя</i>	0,01	0,02	0,05	0,03	0,06	0,09	0,09	0,05	0,02	0,1
<i>Вторичный отказ электродвигателя</i>	0,01	0,02	0,05	0,03	0,06	0,09	0,09	0,05	0,02	0,01
<i>Исходный отказ кабеля</i>	0,02	0,03	0,15	0,05	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02
<i>Вторичный отказ кабеля</i>	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,02	0,08	0,07	0,01	0,02
<i>Исходный отказ выключателя</i>	0,05	0,05	0,15	0,15	0,05	0,03	0,01	0,05	0,05	0,03
<i>Вторичный отказ выключателя</i>	0,03	0,09	0,05	0,02	0,05	0,15	0,05	0,04	0,05	0,01
<i>Исходный отказ генератора</i>	0,05	0,05	0,15	0,15	0,25	0,03	0,01	0,04	0,05	0,03
<i>Вторичный отказ генератора</i>	0,05	0,04	0,03	0,07	0,05	0,02	0,08	0,07	0,01	0,02
<i>Исходный отказ предохранителя</i>	0,15	0,25	0,15	0,15	0,01	0,02	0,03	0,15	0,05	0,05
<i>Вторичный отказ предохранителя</i>	0,05	0,2	0,08	0,05	0,15	0,03	0,06	0,09	0,09	0,01



**Задание 10.** Необходимо вычислить вероятность развития опасной ситуации (конечного события), связанной с разгерметизацией системы перекачки лёгких нефтепродуктов на нефтебазе. Для этого рассмотрим систему перекачки, продемонстрированную на рисунке 18 и соответствующее дерево отказов, показанное на рисунке 19.



1 - реле К1; 2 - цепь В; 3 - переключатель взведения S1; 4- реле К2; Д - реле времени; 6 - датчик давления; 7 - линия измерения давления; 8 - выпускной клапан; 9 - предохранитель; 10 - электродвигатель насоса; 11 - насос; 12 – резервуар под давлением

Рисунок 18 - Принципиальная схема системы перекачки

На схеме показаны взаимосвязи элементов, которые поясняются следующим техническим описанием. В рабочем режиме для пуска системы перекачки переключатель взведения S1 включается и затем сразу же выключается. Электрический ток возбуждает обмотки К1 и К2; контакты реле К1 замыкаются, и цепь ставится на самоблокировку, при этом контакты К2 замыкаются и запускают электродвигатель насоса. В режиме выключения контакты датчика давления должны разомкнуться приблизительно через 20 с (в результате срабатывания датчика при избыточном давлении) и выключить цепь управления, снимая питание с обмотки К2, размыкая контакты К2 и выключая таким образом электродвигатель. Если возникает зависание контактов датчика давления (аварийный режим выключения), контакты реле времени должны разомкнуться через 60 с, снимая питание с обмотки реле К1, которое, в свою очередь, обесточивает обмотку реле К2, вы-

ключая насос. Предполагается, что реле времени взводится автоматически при каждой операции, что насос работает нормально и что бак опорожняется после каждого цикла.

Для системы перекачки имеем следующее последовательности: контакты датчика давления не размыкаются  $\rightarrow$  отказ реле времени  $\rightarrow$  превышение давления  $\rightarrow$  разрыв бака.

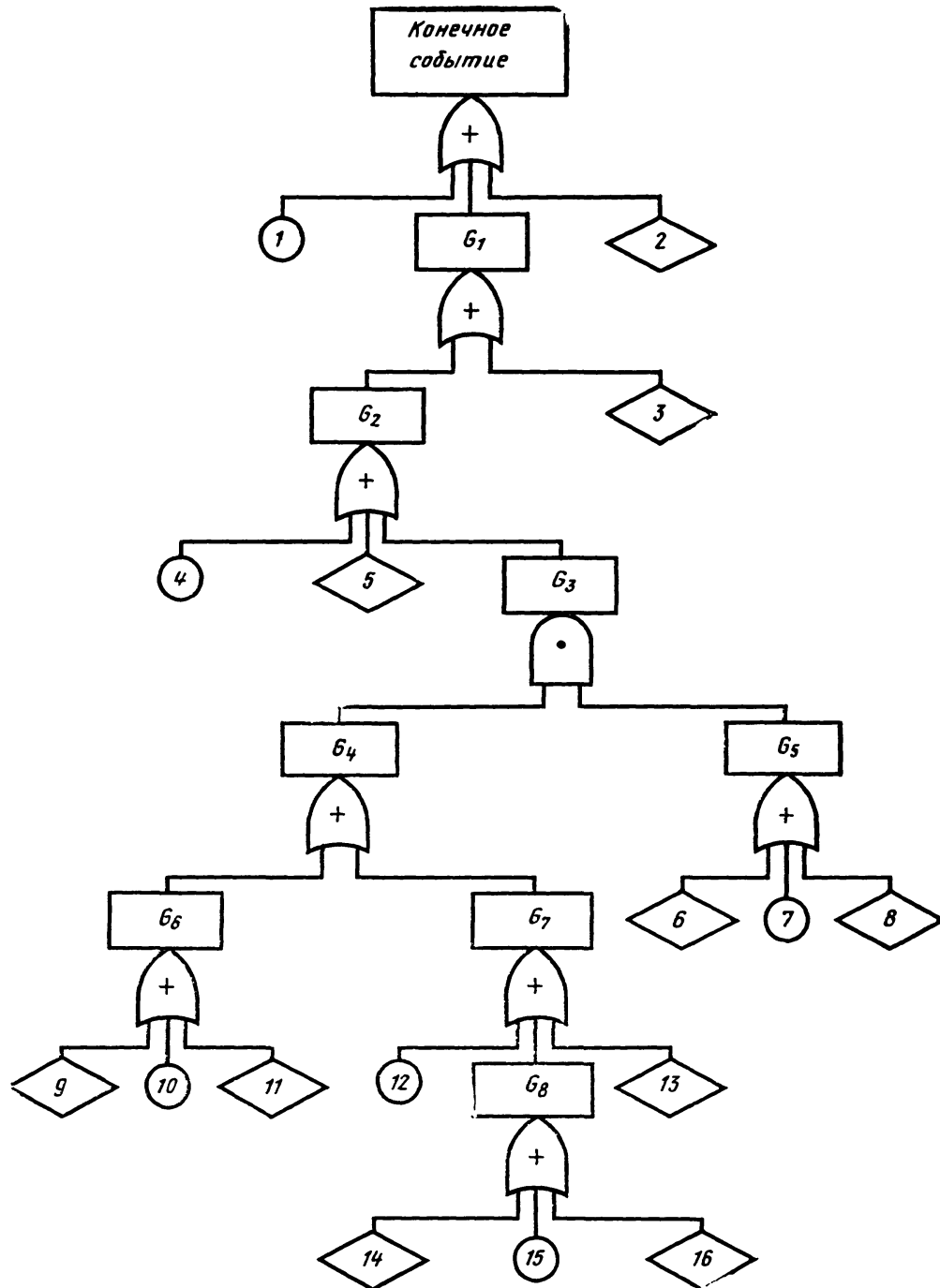


Рисунок 19 - Дерево отказов для системы перекачки с индексами событий

Выбрав определенные пределы воздействия внешних условий, можно детально проследить дальнейшее развитие этих опасных ситуаций в технической системе (техногенного риска) и в окружающей среде. Примерами являются: *взрыв; потеря капитального оборудования; жертвы; ранения; прекращение производства.*

Перечень исходных событий дерева отказов системы перекачки приведен в таблице 7, а их численные значения - в таблице 8.

Таблица 7 - Перечень исходных событий для дерева отказов системы перекачки

Исходное событие	Описание исходного события
1	Отказ бака высокого давления
2	Вторичный отказ бака высокого давления из-за неправильного выбора конструкции бака
3	Вторичный отказ бака высокого давления из-за выхода технологических условий заполнения за допустимые пределы
4	Контакты реле К2 не размыкаются
5	Вторичный отказ реле К2
6	Вторичный отказ контактного датчика давления
7	Контакты датчика давления не размыкаются
8	Контактный датчик не срабатывает при избыточном давлении
9	Вторичный отказ выключателя S1
10	Контакты выключателя S1 не размыкаются
11	Внешняя сила сохраняется на выключателе взведения S1
12	Контакты реле К1 не размыкаются
13	Вторичный отказ реле К1
14	Таймер не отсчитывает время из-за неправильной установки
15	Контакты реле таймера не размыкаются
16	Вторичный отказ реле таймера

Таблица 8 - Варианты значений исходных событий

Номер исходного отказа	Значения исходных событий по вариантам (номер по списку группы)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,01	0,02	0,05	0,03	0,06	0,09	0,09	0,05	0,02	0,01
2	0,01	0,02	0,05	0,03	0,06	0,09	0,09	0,05	0,02	0,01
3	0,02	0,03	0,15	0,05	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02
4	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,02	0,08	0,07	0,01	0,02
5	0,05	0,05	0,15	0,15	0,05	0,03	0,01	0,05	0,05	0,03
6	0,03	0,09	0,05	0,02	0,05	0,15	0,05	0,04	0,05	0,01
7	0,05	0,05	0,15	0,15	0,25	0,03	0,01	0,04	0,05	0,03
8	0,05	0,04	0,03	0,07	0,05	0,02	0,08	0,07	0,01	0,02
9	0,15	0,25	0,15	0,15	0,01	0,02	0,03	0,15	0,05	0,05
10	0,05	0,02	0,08	0,05	0,05	0,03	0,06	0,09	0,09	0,01
11	0,06	0,09	0,09	0,25	0,02	0,01	0,02	0,05	0,03	0,06
12	0,06	0,09	0,09	0,25	0,2	0,01	0,02	0,05	0,03	0,06
1	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05	0,02
3	0,05	0,02	0,08	0,07	0,01	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05
14	0,025	0,03	0,01	0,025	0,015	0,025	0,025	0,025	0,05	0,025
15	0,025	0,015	0,025	0,015	0,025	0,03	0,09	0,08	0,02	0,025
16	0,09	0,08	0,02	0,025	0,015	0,025	0,08	0,07	0,01	0,02

**Задание 11.** Система, показанная на рисунке 20, состоит из двух электрических нагревателей, которые могут отказать при замыкании на землю. На рисунке 21 показано дерево отказов для этой системы.

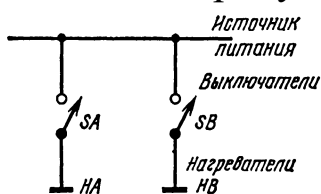


Рисунок 20 – Схема системы электрических нагревателей

Каждый нагреватель HA и HB имеет выключатель SA и SB, подключающий его к источнику питания. Если любой нагреватель отказывает при включенном выключателе, то возникающее в результате этого короткое замыкание вызывает, в свою очередь, короткое замыкание источника питания и полный выход системы из строя. Если один из выключателей отказывает в разомкнутом состоянии или ошибочно выключается до возникновения отказа нагревателя, то только эта часть системы отказывает и последняя работает на половину мощности.

Необходимо вычислить вероятность наступления конечного события для системы электрических нагревателей. Варианты значений исходных событий 1-6 принять по таблице 8.

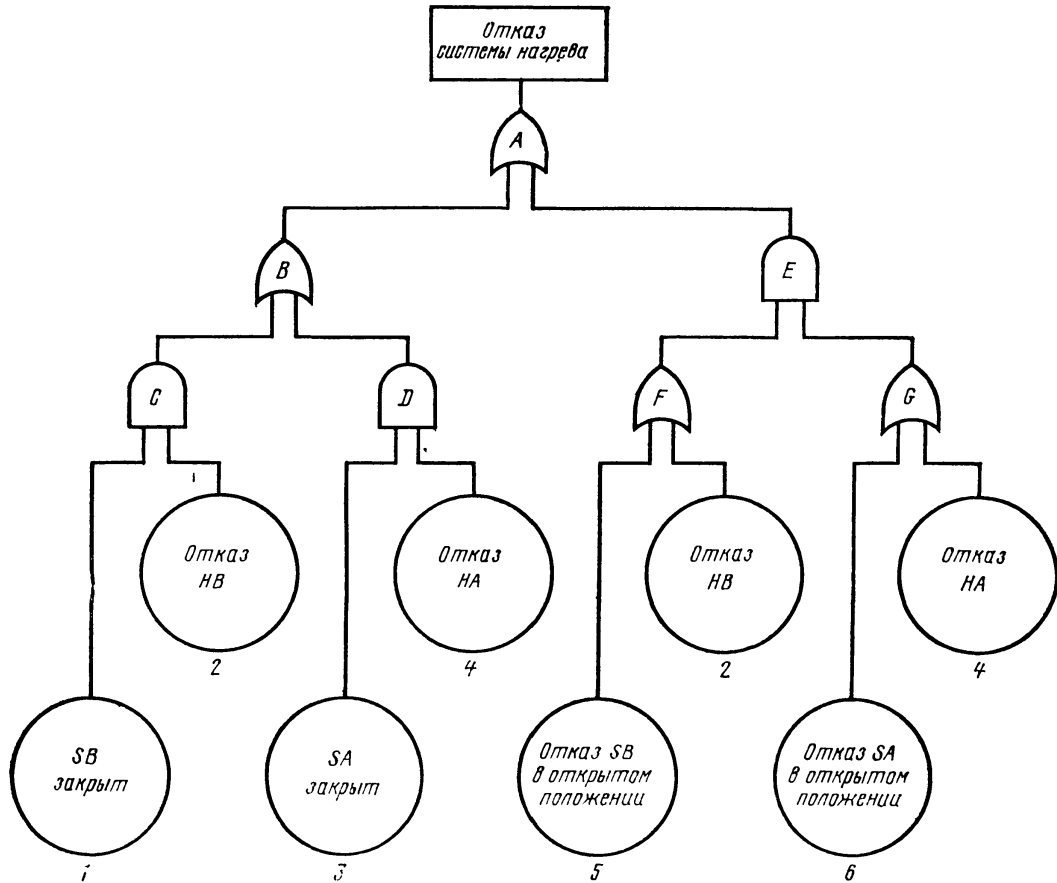


Рисунок 21- Дерево отказов для системы электрических нагревателей

## Вопросы и задания

1. Для каких целей выполняется количественная оценка дерева отказов?
2. Какие данные необходимы для количественной оценки дерева отказов?
3. Перечислите основные этапы процедуры количественной оценки дерева отказов.
4. Каким методом в данной практической работе выполнялась количественная оценка дерева отказов?
5. На основании какой информации выполняется количественная оценка для завершающего события в дереве отказов?
6. К каким событиям относятся отказы элементов, входящих в состав системы?
7. Какая теорема сложения и умножения вероятностей случайных событий лежит в основе вычисления логического знака «ИЛИ»?
8. Какая теорема сложения и умножения вероятностей случайных событий лежит в основе вычисления логического знака «И»?
9. Какой теореме сложения и умножения вероятностей случайных событий соответствует данная запись:  $P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(A_i))$ , и какой логический знак вычисляется с помощью данного выражения?
10. Какой теореме сложения и умножения вероятностей случайных событий соответствует данная запись:  $P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i)$ , и какой логический знак вычисляется с помощью данного выражения?
11. Закончите определение: «Случайное событие - ...».
12. Закончите определение: «Зависимые события - ...».
13. Закончите определение: «Независимые события - ...».
14. Закончите определение: «Несовместные события - ...».
15. Закончите определение: «Совместные события - ...».
16. Какие события вычисляются с помощью логических знаков **И**, **ИЛИ**?
17. Какой логический знак вычисляется с помощью данного выражения?  

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB).$$
18. Какой логический знак вычисляется с помощью данного выражения?  

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B).$$
19. Какая логическая схема изображается символом  $\cup$  или «+»?
20. Какая логическая схема изображается символом  $\cap$  или «•»?
21. На чем основывается метод определения численного значения вероятности появления завершающего события в дереве отказов?
22. В каком порядке производится вычисления в дереве отказов?

### Список источников информации

1. ГОСТ Р 27.302-2009. Анализ дерева неисправностей. - М.: Стандартинформ, 2011. - 22 с.
2. ГОСТ Р 51901.13-2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей: Fault Tree Analysis (FTA). - М.: Стандартинформ, 2005. - 13 с.
3. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / под ред. М. И. Фалеева. - М.: Деловой экспресс, 2002. - 368 с.
4. Томаков В.И. Прогнозирование техногенного риска с помощью «Деревьев отказов»: учебное пособие. - Курск, 1997. - 99 с.

### Содержание

1 Общие положения о выполнении практической работы.....	3
2 Процедура количественной оценки дерева отказов.....	4
3 Вероятностная оценка дерева отказов.....	5
3.1 Основные понятия о случайных событиях.....	5
3.2 Теоремы сложения и умножения вероятностей случайных событий	6
3.3 Аналитическое описание простых схем.....	8
4 Практическая часть.....	10
5 Дополнительные задания, для студентов пропускающих аудиторные занятия.....	20
Вопросы и задания.....	27
Список источников информации.....	28

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



О. Г. Локтионова

*О. Г. Локтионова*

2017 г.

**КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ДЕРЕВЬЕВ ОТКАЗОВ**

Методические указания для выполнения  
практической работы по дисциплине  
«Надёжность технических систем и техногенный риск»  
для студентов, обучающихся по направлению  
«Техносферная безопасность»

Курск 2017



УДК 658.34:621.3

Составители: В.И. Томаков, М.В. Томаков

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *А.В. Беседин*

**Качественная оценка деревьев отказов** : методические указания для выполнения практической работы по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск» для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Томаков, М.В. Томаков. – Курск, 2017. – 16 с.

Изучается логический метод оценки дерева отказов. Метод используется для прогнозирования появления нежелательных сочетаний элементарных исходных событий, которые обязательно приводят к появлению завершающего события в дереве отказов.

При выполнении практической работы у обучающихся формируется компетенция: способностью оценивать риск и определять меры по обеспечению безопасности разрабатываемой техники (ПК-3).

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 27.01.2017 г. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,7. Уч. изд. л. 0,6. Тираж 100 экз. Заказ 28. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет  
305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**Цель практической работы:**

- изучить методику качественной оценки наступления завершающего события в дереве отказов;
- приобретение практических навыков, необходимых для качественной оценки дерева отказов.

**Указания к выполнению практической работы**

Законспектируйте содержание основных положений порядка качественной оценки дерева отказов, основные понятия, а также алгоритм действий и необходимые для выполнения работы правила.

Выполните задания по указанию преподавателя.

Ответьте письменно на вопросы и задания по указанию преподавателя.

**Отчет о выполненной работе****1. Конспект, включающий:**

- основные понятия о методе качественной оценки дерева отказов;
- основные понятия метода;
- основные положения и алгоритм качественной оценки дерева отказов.

**2. Необходимые схемы и преобразования.****3. Письменные ответы на контрольные вопросы и задания.**

Работа должна быть выполнена собственноручно.

Отчет следует предоставить на сброшюрованных листах формата А4 или в отдельной ученической тетради.

Схемы следует выполнять, используя чертежные шаблоны или инструменты.

## **1 Задачи качественной оценки дерева отказов**

Отказ технической системы может произойти различными путями. Каждый отличающийся от других путь есть вид отказа системы, включающий отказ одного или нескольких элементов системы. С целью уменьшения возможности отказа системы необходимо выявить виды отказов и затем установить наиболее часто повторяющиеся (случающиеся) или наиболее вероятные из них.

Качественная оценка позволяет выполнить идентификацию событий или комбинации событий, ведущих к вершине дерева отказов - завершающему нежелательному событию.

Качественная оценка дерева отказов даёт наглядное представление о поведении технической системы в плане надёжности, так как помогает выявлять сочетания исходных отказов элементов системы, которые обязательно или с большой вероятностью могут привести к нежелательному завершающему событию, а также установить наиболее часто встречающиеся элементы, из-за отказа которых произойдёт общий отказ всей системы.

Качественный анализ позволяет конструкторам, пользователям и руководителям обосновать конструктивные изменения в плане безопасности, облегчает анализ надёжности сложных систем.

## **2 Метод качественной оценки дерева отказов - метод «Минимальных аварийных сочетаний»**

Качественная оценка основана на использовании т.н. минимальных сечений дерева отказов. Сечение определяется как минимальное количество элементарных событий, образующих сочетания, приводящих к нежелательному исходу - событию.

Если из множества событий, принадлежащих некоторому сечению, нельзя исключить ни одного события, и в то же время это множество событий из сочетаний приводит к нежелательному исходу, то в этом случае говорят о наличии минимального сечения или минимального аварийного сочетания исходных событий. Поэтому этот метод называют методом «*Минимальных аварийных сочетаний*» - МАС.

Метод МАС даёт возможность сократить число аварийных сочетаний и число исходных событий, входящих в каждое аварийное сочетание. Это упрощает проведение анализа ДО, в т.ч. количественного.

Рассматриваемый метод качественной оценки дерева отказов основан на использовании так называемых минимальных аварийных сочетаний (сечений) дерева отказов (МАС). Поэтому введем понятия: «сечение», «сочетание», «минимальное сечение», «минимальное аварийное сочетание».

*Сочетание (сечение)* - это совокупность основных событий, осуществление которых вызывает наступление завершающего события.

*Сочетание (сечение) называется минимальным*, если число принадлежащих ему событий не может быть уменьшено, и оно по-прежнему приводит к наступлению завершающего события.

*Сочетание (сечение)* определяется как некоторое множество основных исходных событий всех видов, осуществление которых вызывает наступление завершающего события.

*Минимальное аварийное сочетание* - это определенный наименьший набор исходных событий; если все эти исходные события случаются, существует гарантия, что конечное событие в дереве отказов происходит.

### 3 Алгоритм качественной оценки дерева отказов

Алгоритм логической оценки ДО учитывает правило, что любое событие на входе логических схем **И**, **ИЛИ** вызывает появление одного события на её выходе. Поэтому все события на входе схем **И**, **ИЛИ** являются элементами отдельных сечений. Поэтому в ряде случаев качественную оценку дерева отказов называют логической.

Алгоритм логической оценки ДО учитывает тот факт, что логическая схема **ИЛИ** всегда увеличивает число (количество) сочетаний (сечений), а логическая схема **И** всегда увеличивает размер сочетания (сечения) за счет увеличения числа входящих в сочетание исходных элементарных событий.

Алгоритм работает следующим образом.

1. Присвоить буквенный символ каждому логическому знаку.
2. Пронумеровать каждое исходное событие.
3. Отыскать самый верхний логический элемент. Анализ выполняется сверху вниз. Это будет первая строка первого столбца матрицы.

4. Последовательно, методом итераций выполнить один из двух типов основных перестановок - (а) или (б) по порядку сверху вниз:

а) логические знаки **ИЛИ** заменить построениями вертикального типа входов в эти логические знаки (столбец) и увеличить число аварийных сочетаний;

б) логические знаки **И** заменить построениями горизонтального типа входов в эти логические знаки (строка) и увеличить размеры аварийных сочетаний.

5. Когда все логические знаки заменены исходными событиями, следует получить минимальные аварийные сочетания, удалив повторяющиеся аварийные сочетания (в случае их наличия).

**Пример 1.** Рассмотрим работу алгоритма для гипотетического дерева отказов, приведенного на рисунке 1. Этот пример будет полезен для понимания практических основ работы этого алгоритма.

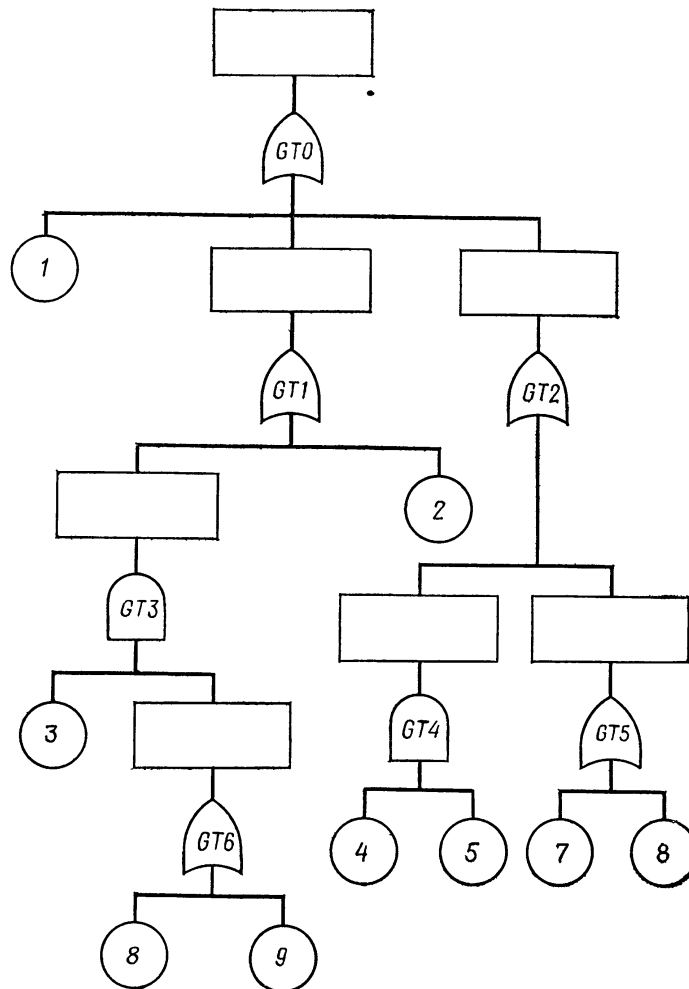


Рисунок 1 - Гипотетическое дерево отказов

Событие 6, согласно правилам построения ДО, исключено ввиду малого значения вероятности его появления ( $P \times 10^{-8}$ ) за время  $t$ .

Логическим знакам и исходным событиям этого дерева отказов уже присвоены необходимые обозначения.

Работа алгоритма начинается с логического узла GT0, изображенного под прямоугольником в ДО, который соответствует завершающему событию. Он расположен в самом верху.

GT0

Этот логический узел GT0 конечного события является схемой **ИЛИ**. Поэтому каждый её вход соответствует элементу определенной строки матричного списка. Составление матричного списка начинается с записи выходных событий 1, GT1 и GT2 на входе в GT0 в одном столбце, но в разных строках, т.е. с замены GT0 (шаг 1):

1		
GT1		<i>шаг 1</i>
GT2		

Чтобы получить полный матричный список, заменяем схему **ИЛИ** GT1 событиями на ее входе, которые записываются в отдельные строки, как показано ниже (шаг 2):

1		
GT3		<i>шаг 2</i>
2		
		GT2

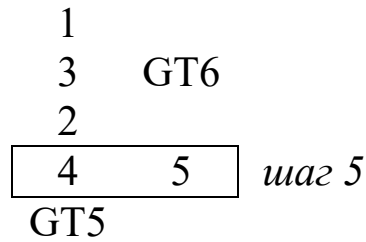
Аналогично заменяем схему GT2 событиями на ее входе (шаг 3):

1		
GT3		<i>шаг 3</i>
2		
GT4		<i>шаг 3</i>
GT5		

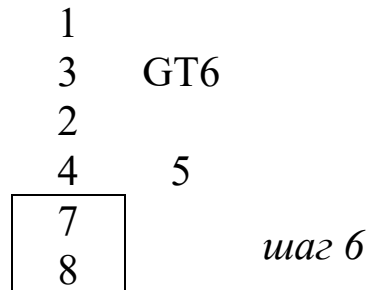
Точно так же поступаем и со схемой GT3. Поскольку это схема **И**, то она заменяется событиями на ее входе построениями горизонтального типа входов (по строке) в этот логический знак (шаг 4):

1		
3	GT6	<i>шаг 4</i>
2		
		GT4
		GT5

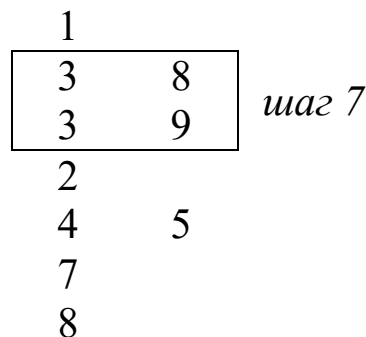
Аналогично схема GT4 заменяется событиями на ее входе (шаг 5):



Поскольку схема GT5 является схемой **ИЛИ**, она заменяется входными событиями, 7, 8 (шаг 6):



Логический узел GT6 также представляет собой схему **ИЛИ**, которая заменяется событиями 8 и 9 на ее входе (шаг 7):



Как видно из полученного матричного списка, сочетание {8} содержит единственное исходное событие. Если это нежелательное событие произойдет, то, невзирая на то, что имеется сечение {3, 8}, обязательно произойдет головное событие, например отказ всей системы, авария и т.п. Поэтому, исключая сечение {3, 8}, получаем следующие минимальные сечения: {1}, {2}, {7}, {8}, {3, 9}, {4, 5}.

## 4 Практическая часть

**Задание 1.** На рисунке 2 приведено дерево отказов для системы перекачки нефтепродуктов с завершающим событием «разрыв бака». Логическим знакам и основным исходным событиям этого дерева уже присвоены необходимые обозначения. Найти перечень минимальных аварийных сочетаний.

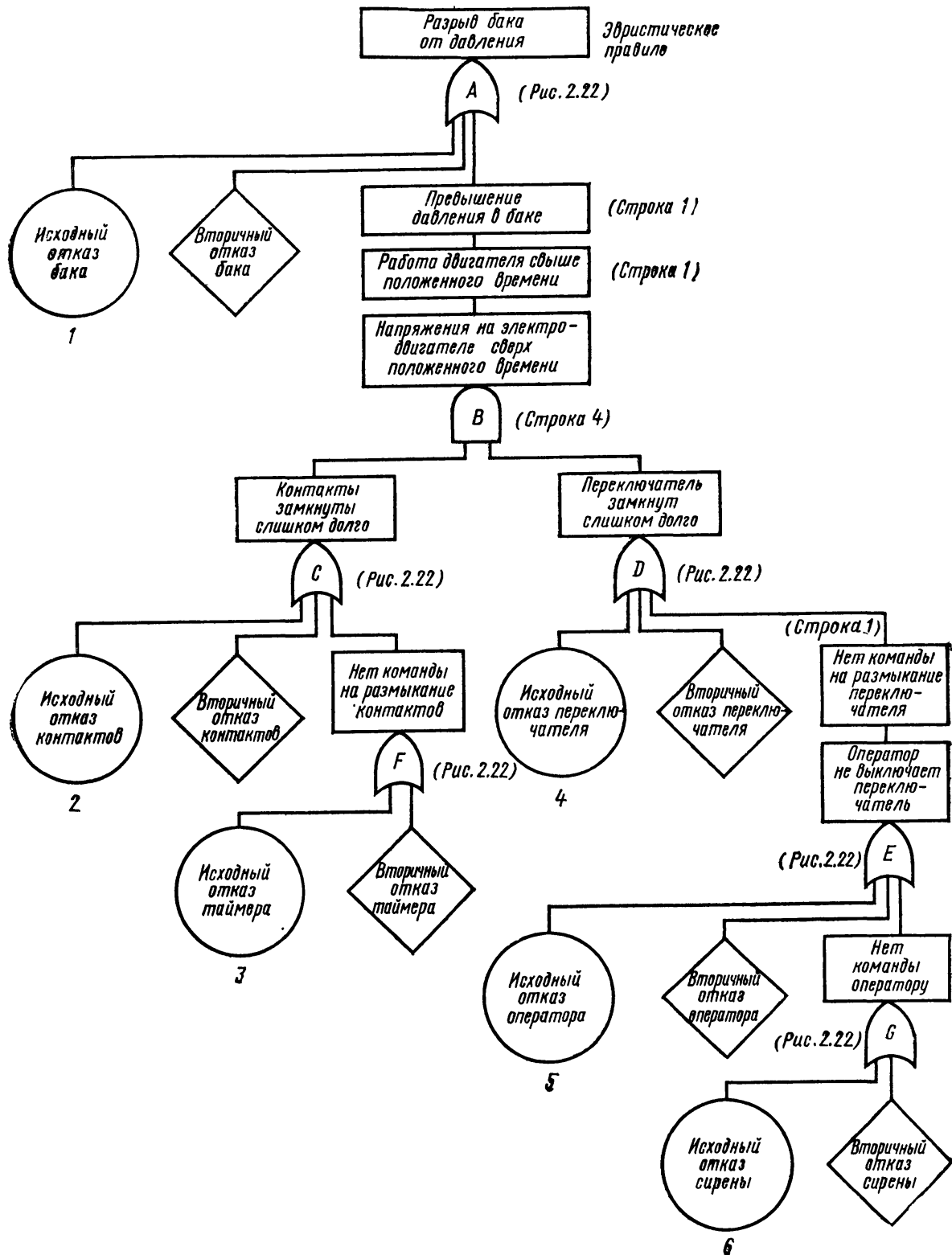


Рисунок 2 - Дерево отказов для системы перекачки

**Задание 2.** На рисунке 3 приведена схема блока выключателей и соответствующее дерево отказов. Требуется найти перечень минимальных аварийных сочетаний.



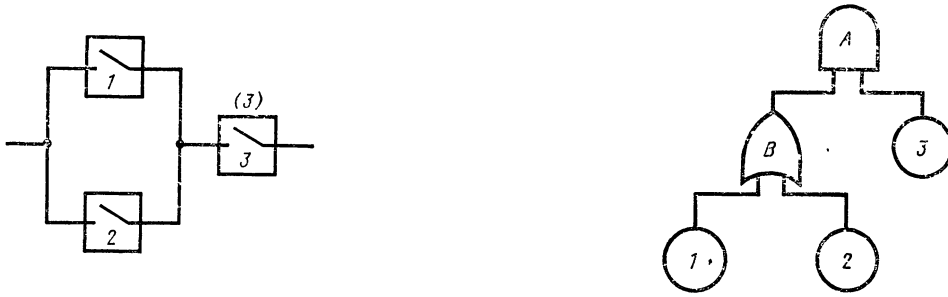
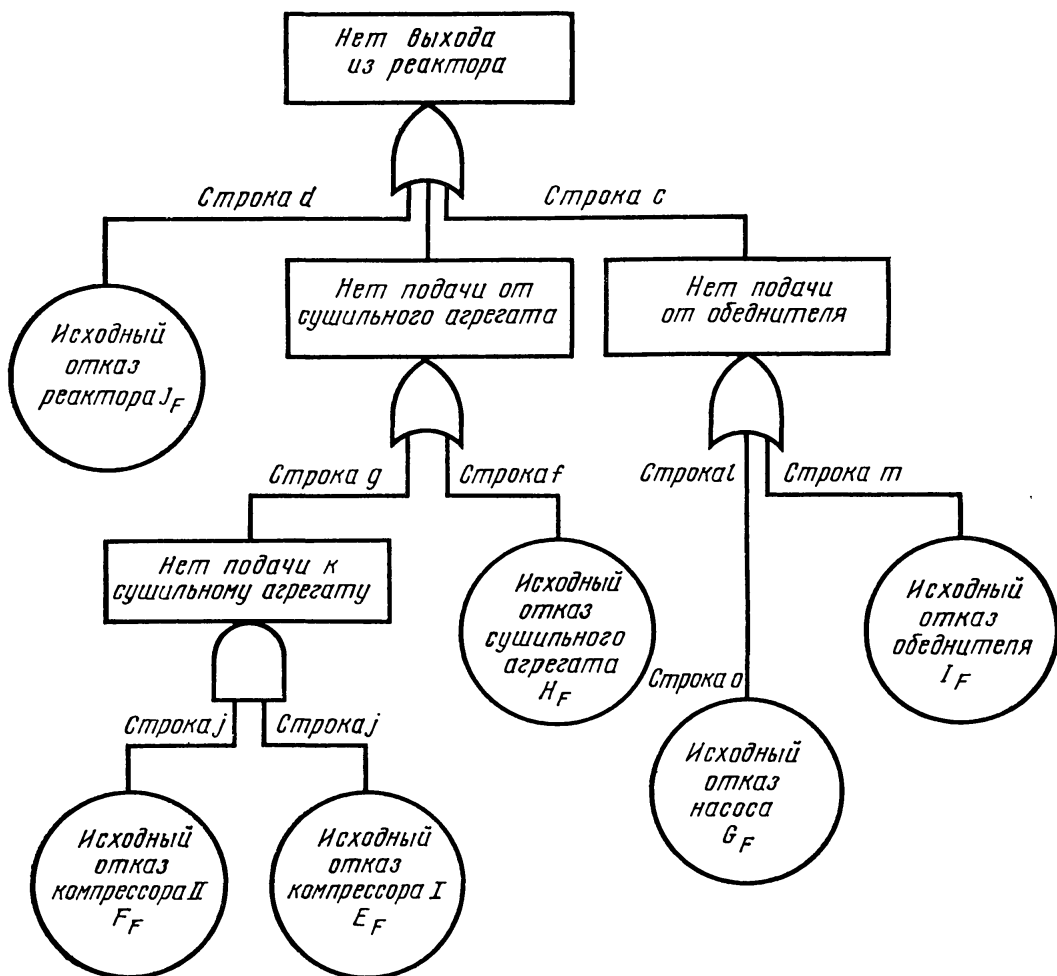


Рисунок 3 - Схема блока выключателей и соответствующее дерево отказов

**Задание 3.** На рисунке 4 приведено дерево отказов для химического реактора. Требуется найти перечень минимальных аварийных сочетаний.



**Задание 4.** На рисунке 5 показано дерево отказов для системы электрических нагревателей. Логическим знакам и основным исходным событиям этого дерева уже присвоены необходимые обозначения. Найти перечень минимальных аварийных сочетаний.

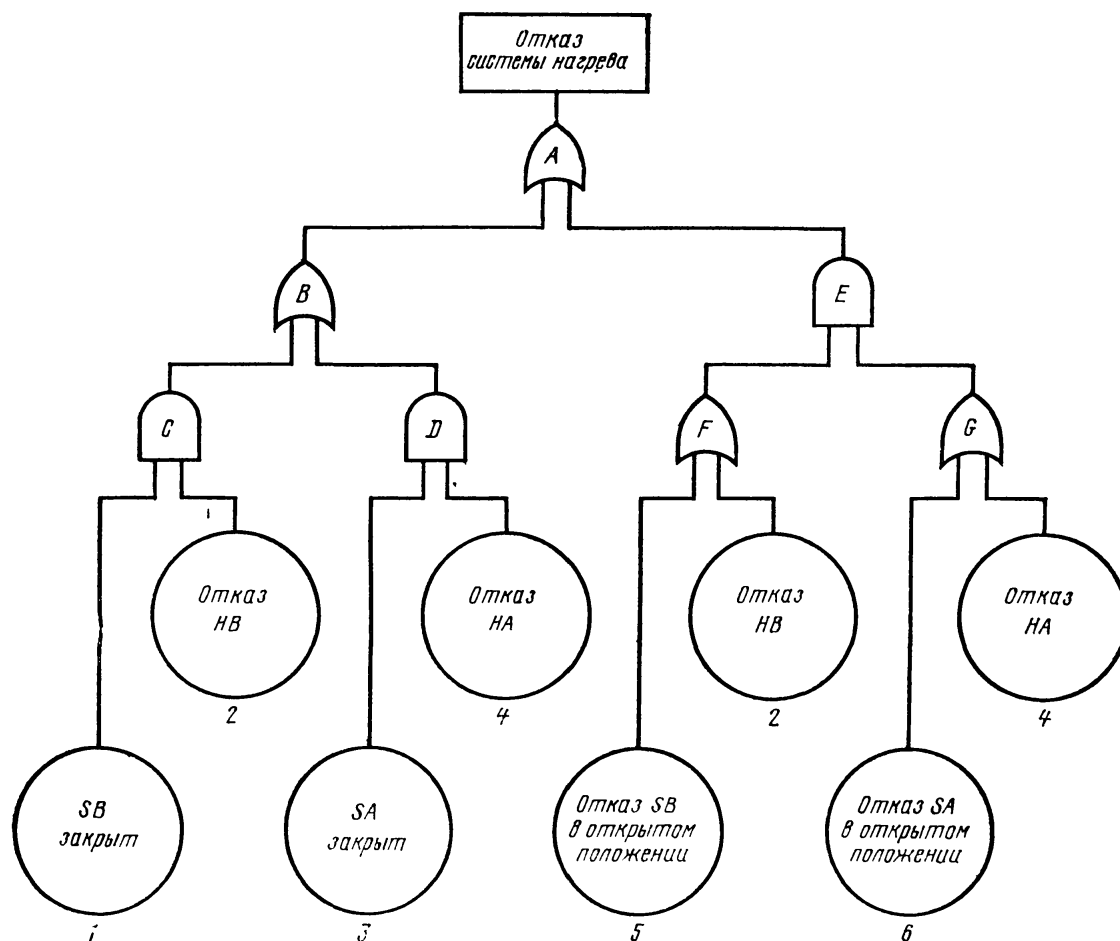


Рисунок 5 - Дерево отказов  
для системы электрических нагревателей

**Задание 5.** Найти перечень минимальных аварийных сочетаний для дерева событий возникновения пожара, показанного на рисунке 6.

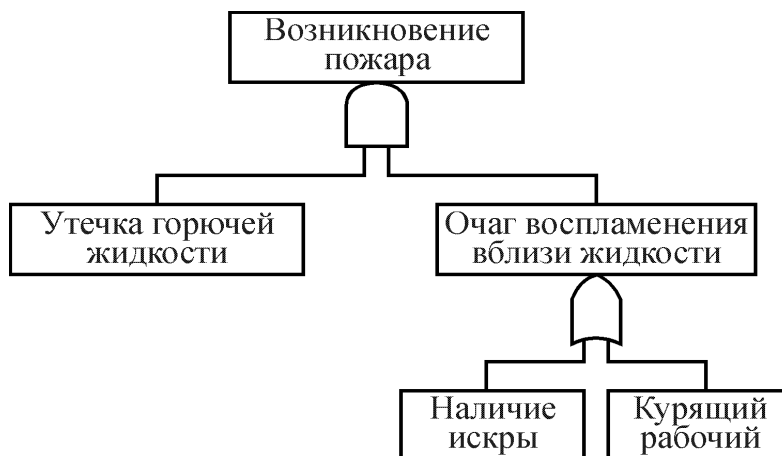


Рисунок 6 - Дерево событий

**Задание 6.** На рисунке 7 показано дерево отказов релейной системы включения освещения с общими событиями. Логическим знакам и основным исходным событиям этого дерева уже присвоены необходимые обозначения. Найти перечень минимальных аварийных сочетаний.

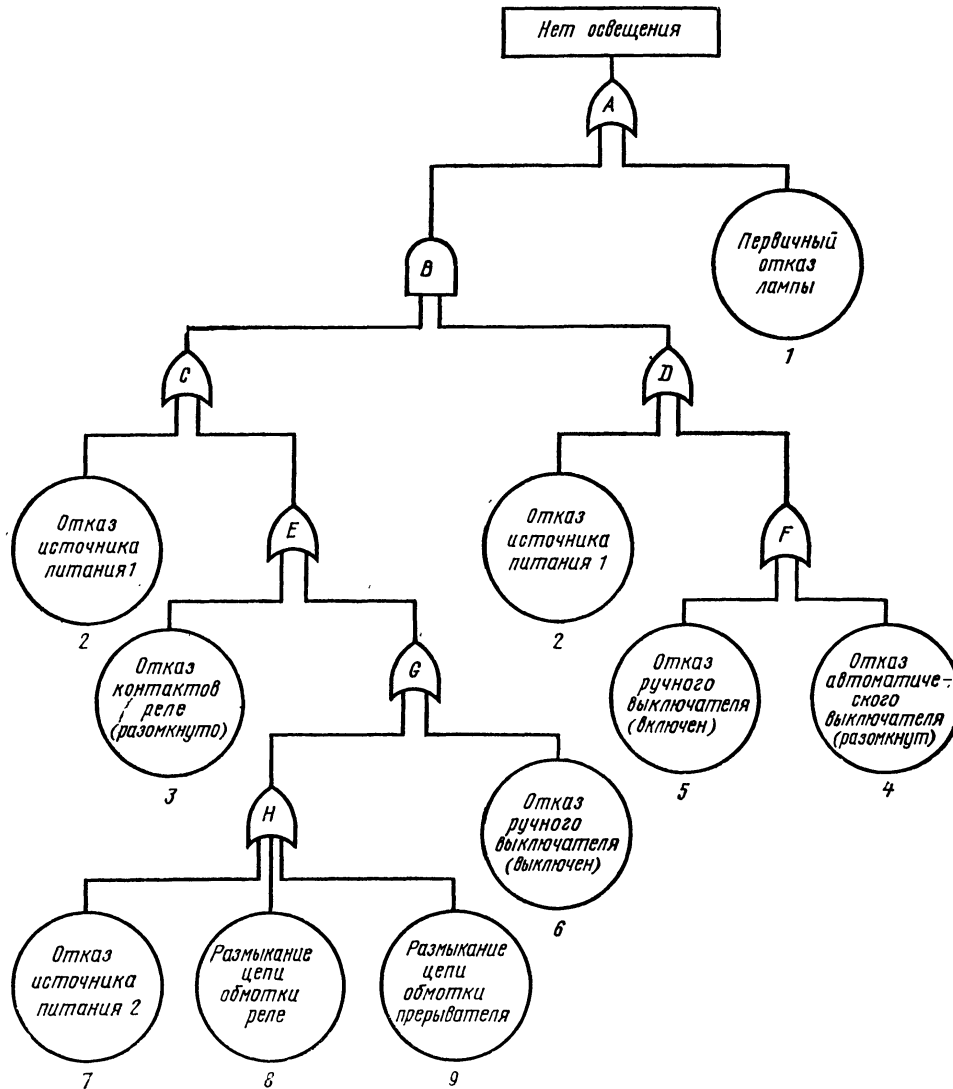


Рисунок 7 – Дерево отказов релейной системы включения освещения с общими событиями

**Задание 7.** На рисунке 8 показана структурно-логическая схема причин поражения человека при пожаре в виде модели «дерева отказа». Как видно из схемы, поражение человека при пожаре произойдет, если одновременно возникнут три события: 1) человек не сможет эвакуироваться из горящего здания; 2) не сработает автоматическая система пожаротушения; 3) человека не смогут спасти силы противопожарной службы. Найти перечень минимальных аварийных сочета-

ний.

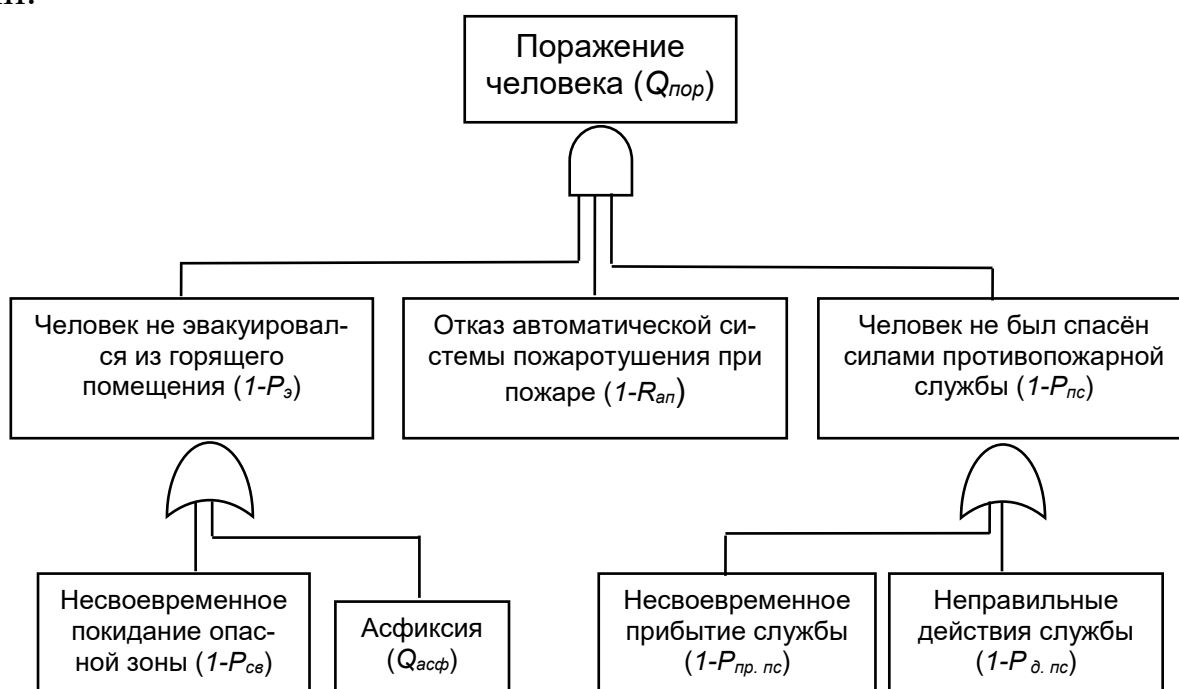


Рисунок 8 - Структурно-логическая схема причин поражения человека при пожаре

## 5 Дополнительные задания для студентов, пропускающих аудиторные занятия

**Задание 5.1.** На рисунке 5.1 показано дерево отказов системы автоматизированной заправки емкости с исходными событиями, приведенными в таблице 5.1. Основным исходным событиям этого дерева уже присвоены необходимые обозначения. Найти перечень минимальных аварийных сочетаний.

Таблица 5.1 - Исходные события дерева отказов

№ п.п.	Событие или состояние
1	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной (ошибка контроля исходного положения)
2	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объема дозы
3	Ослабление сигнала выдачи дозы помехами (нерасчетное внешнее воздействие)
4	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы
5	Отказ расходомера
6	Отказ датчика уровня
7	Оператор не заметил световой индикации о неисправности САВД

№ п.п.	Событие или состояние
	(ошибка оператора)
8	Оператор не услышал звуковой сигнализации об отказе САВД (ошибка оператора)
9	Оператор не знал о необходимости отключения насоса по истечении заданного времени
10	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении установленного времени заправки
11	Отказ хронометра
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насоса
13	Обрыв цепей управления приводом насоса

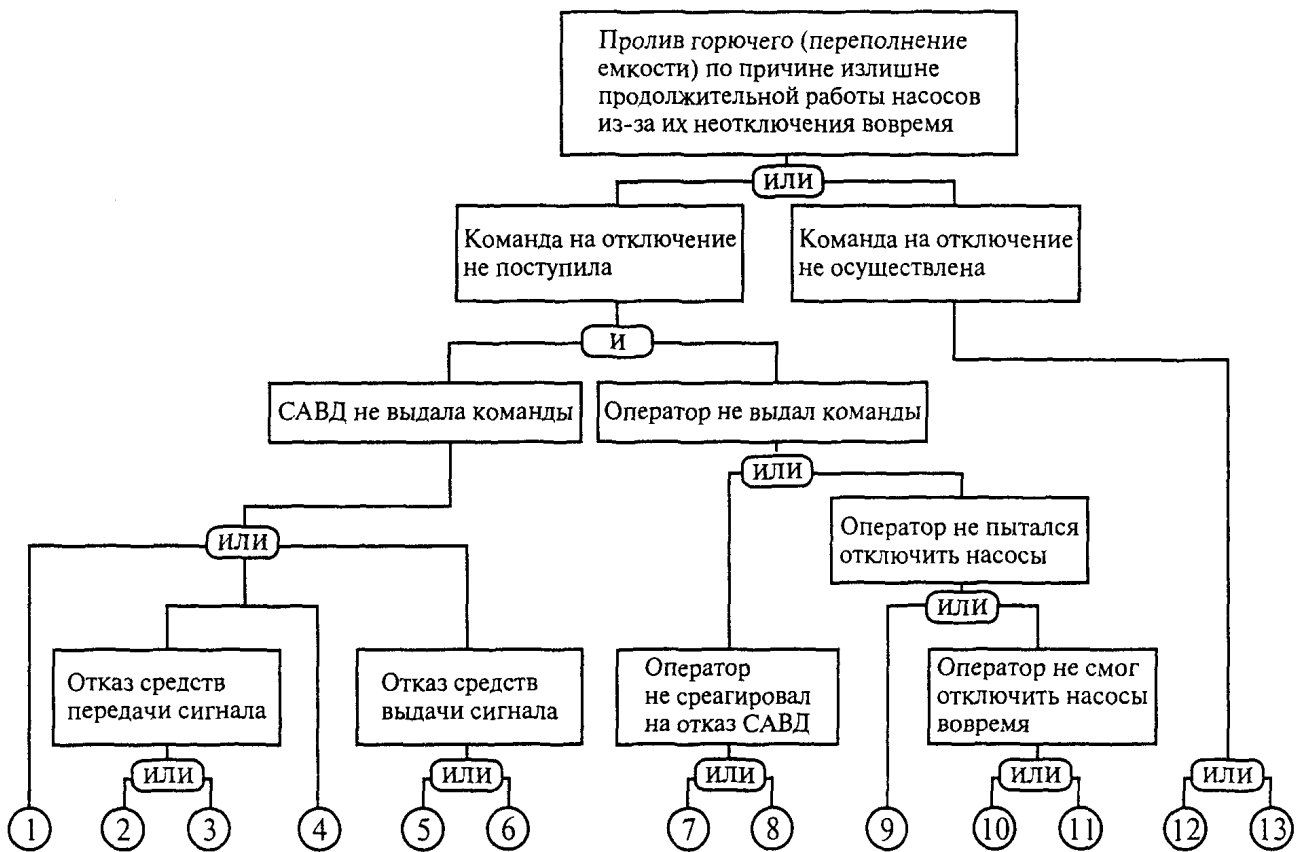


Рисунок 5.1 - Дерево отказов заправочной операции

**Задание 5.2.** На рисунке 5.2 показано дерево отказов системы очистки отходящих газов с общими событиями. Логическим знакам и основным исходным событиям этого дерева уже присвоены необходимые обозначения. Найти перечень минимальных аварийных сочетаний.

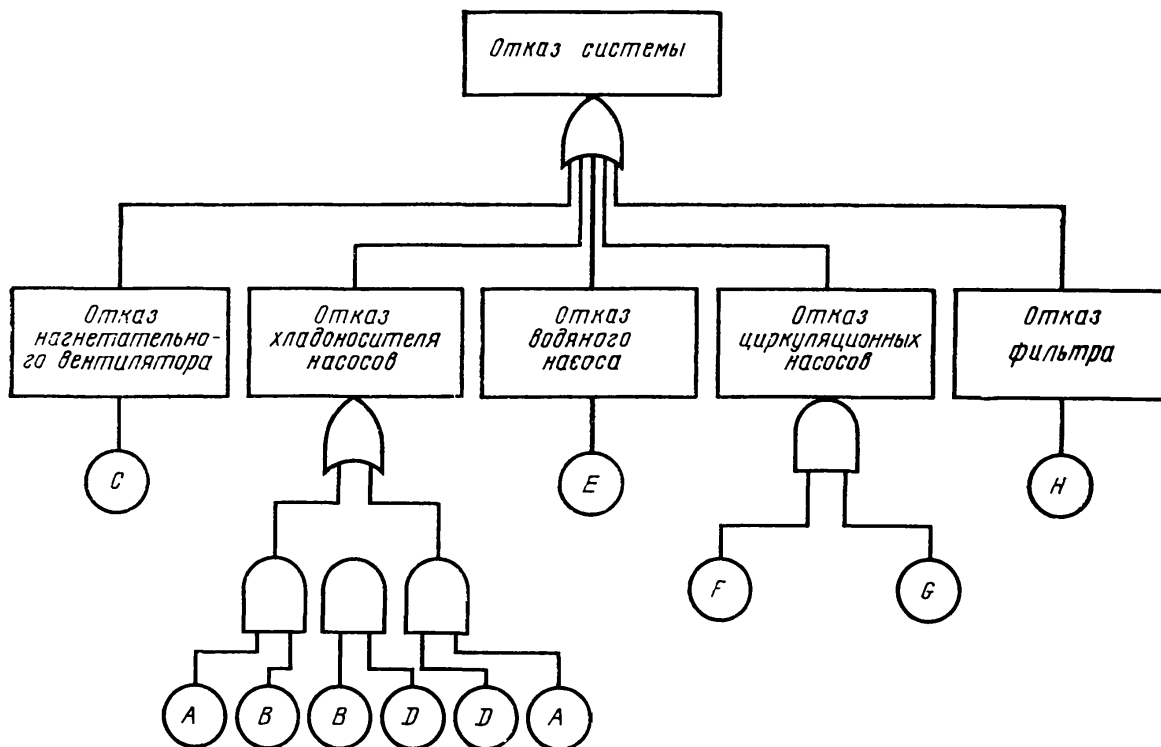


Рисунок 5.2 - Дерево отказов для системы охлаждения и очистки отработавшего газа

### Вопросы и задания

1. Для каких целей выполняется качественная оценка дерева отказов?
2. Какие данные необходимы для качественной оценки дерева отказов?
3. Перечислите основные этапы процедуры качественной оценки дерева отказов.
4. Каким методом в данной практической работе выполнялась качественная оценка дерева отказов?
5. Сформулируйте правило замены логического знака **ИЛИ** входами событий в этот логический знак.
6. Сформулируйте правило замены логического знака **И** входами событий в этот логический знак.
7. Заполните пробел в записанном логическом правиле: «Знаки **ИЛИ** \_\_\_\_\_ число аварийных сочетаний».
8. Заполните пробел в записанном логическом правиле: «Знаки **И** \_\_\_\_\_ число аварийных сочетаний».
9. В каком порядке производится логический анализ дерева отказов?
10. Сформулируйте определение: «Аварийное сочетание - это ...»
11. В каком случае, согласно логическому анализу ДО, существует гаран-

тия, что конечное событие (отказ) происходит?

12. Сформулируйте определение: «Минимальное аварийное сочетание – это ...».

13. Закончите определение: «Множество основных исходных событий, осуществление которых вызывает наступление завершающего события, определяется как ...».

14. Что понимается под сочетанием (сечением) в дереве отказов?

### Список источников информации

1. ГОСТ Р 27.302-2009. Анализ дерева неисправностей. - М.: Стандартинформ, 2011. - 22 с.

2. ГОСТ Р 51901.13-2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей: Fault Tree Analysis (FTA). - М.: Стандартинформ, 2005. - 13 с.

3. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / под ред. М. И. Фалеева. - М.: Деловой экспресс, 2002. - 368 с.

4. Томаков В.И. Прогнозирование техногенного риска с помощью «Деревьев отказов»: учебное пособие. - Курск, 1997. - 99 с.

### Содержание

1 Общие положения о выполнении практической работы.....	3
2 Процедура количественной оценки дерева отказов.....	4
3 Вероятностная оценка дерева отказов.....	5
3.1 Основные понятия о случайных событиях.....	5
3.2 Теоремы сложения и умножения вероятностей случайных событий	6
3.3 Аналитическое описание простых схем.....	8
4 Практическая часть.....	10
5 Дополнительные задания, для студентов пропускающих аудиторные занятия.....	20
Вопросы и задания.....	27
Список источников информации.....	28

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –  
проректор по учебной работе



Кудряшов Е.А.

2012 г.

### Методическое пособие

к выполнению практических работ по дисциплине надежность  
технических систем и техногенный риск для студентов  
специальностей Безопасность жизнедеятельности в техносфере,  
Инженерная защита окружающей среды и направления подготовки  
Защита окружающей среды

Курск 2012



УДК 504.06 : УДК 621.3.019

Составители: В.И. Томаков, М.В. Томаков, А.В. Коренева

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Беседин А.В.

**Методическое пособие** к выполнению практических работ по дисциплине надежность технических систем и техногенный риск для студентов специальностей Безопасность жизнедеятельности в техносфере, Инженерная защита окружающей среды и направления подготовки Защита окружающей среды / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Томаков, М.В. Томаков, А.В. Коренева. Курск, 2012 г. 91 с.: ил. 32, прилож. 4. Библиогр.: с.93.

Методическое пособие составлено в соответствии с программой учебной дисциплины Надежность технических систем и техногенный риск. Рассмотрены понятия, законы распределения отказов, способы резервирования и основных методы расчета надежности систем до первого отказа. Разобрано решение задач.

Предназначено студентам дневной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. . Уч. - изд. л. . Тираж 30 экз. Заказ . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ .....</b>	<b>7</b>
1.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ .....	7
1.2. ОБЪЕКТ, ЭЛЕМЕНТ, СИСТЕМА .....	7
1.2.1. <i>Состояние объекта.....</i>	<i>8</i>
1.2.2. <i>Переход объекта в различные состояния.....</i>	<i>10</i>
1.2.3. <i>Временные характеристики объекта.....</i>	<i>12</i>
1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ.....	12
1.3.1. <i>Показатели безотказности и ремонтпригодности.....</i>	<i>15</i>
1.3.2. <i>Показатели долговечности и сохраняемости.....</i>	<i>18</i>
1.4. ВИДЫ НАДЕЖНОСТИ .....	19
1.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТКАЗОВ .....	19
<b>2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ.....</b>	<b>23</b>
2.1. КРИТЕРИИ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ .....	23
2.1.2. <i>Критерии надежности невосстанавливаемых объектов .....</i>	<i>23</i>
2.1.3. <i>Критерии надежности восстанавливаемых объектов .....</i>	<i>27</i>
<b>3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ.....</b>	<b>34</b>
3.1. СЛУЧАЙНОЕ СОБЫТИЕ .....	34
3.2. СЛУЧАЙНАЯ ВЕЛИЧИНА .....	35
3.3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ .....	38
3.4. О ВЫБОРЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ПРИ РАСЧЕТЕ НАДЕЖНОСТИ ...	48
<b>4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ.....</b>	<b>49</b>
4.1. ВИДЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ .....	49
4.2. СПОСОБЫ СТРУКТУРНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ .....	50
<b>5. ОСНОВЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПО НАДЕЖНОСТИ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ.....</b>	<b>54</b>
5.1. ЦЕЛЕВОЕ НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА .....	54
5.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА СИСТЕМ.....	56
5.3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАРАЛЛЕЛЬНО- ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР .....	58
5.3.1. <i>Система с последовательным соединением элементов .....</i>	<i>58</i>
5.3.2. <i>Система с параллельным соединением элементов.....</i>	<i>62</i>
5.3.3. <i>Способы преобразования сложных структур .....</i>	<i>65</i>
5.4. НАДЕЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ.....	70
5.4.1. <i>Параллельное соединение резервного оборудования системы .....</i>	<i>70</i>
5.4.2. <i>Включение резервного оборудования системы замещением .....</i>	<i>71</i>

5.4.3. Надежность резервированной системы в случае комбинаций отказов и внешних воздействий.....	74
5.4.4. Анализ надежности систем при множественных отказах.....	75
5.4.5. Модель надежности системы с множественными отказами.....	85
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....</b>	<b>89</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....</b>	<b>90</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....</b>	<b>91</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4 .....</b>	<b>92</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>93</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Теория надежности - сравнительно молодая научно-техническая дисциплина, формирование которой в современном виде относится к 50-м годам XX столетия. Первые шаги в области исследований надежности были связаны со сбором статистических данных о надежности радиоэлементов, а все усилия специалистов были направлены на определение причин ненадежности. Следующими шагами стали: развитие физической надежности (физики отказов) и развитие математических основ теории надежности, явившихся обязательным атрибутом разработки и проектирования сложных и ответственных технических систем. В этом ракурсе под теорией надежности понимают научную дисциплину, которая изучает закономерности сохранения во времени техническими системами свойства выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов и транспортирования.

Основные вопросы, которые изучает теория надежности - отказы технических элементов (средств, систем); критерии и количественные характеристики надежности; методы анализа и повышения надежности элементов и систем на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации; методы испытания технических средств на надежность: методы оценки эффективности повышения надежности.

В конкретных областях техники разрабатывались и продолжают разрабатываться прикладные вопросы надежности, вопросы обеспечения надежности данной конкретной техники (радиоэлектронные приборы, средства вычислительной техники, транспортные машины, продуктопроводы, химические реакторы и т.д.). При этом решается вопрос о наиболее рациональном использовании общей теории надежности в конкретной области техники и ведется разработка таких новых положений, методов и приемов, которые отражают специфику данного вида техники. Так возникла прикладная теория надежности.

Обеспечение надежности является серьезной задачей для специалиста, эксплуатирующего сложные технические системы, отказ которых может привести к авариям и чрезвычайным происшествиям. *Во-первых*, он должен рассмотреть последствия каждого отказа. Неучтенные отказы могут стать впоследствии

причиной невыполнения производственной программы. **Во-вторых**, частые отказы или длительные периоды неисправного состояния могут привести к полной потере работоспособности системы и ее непригодности к последующей эксплуатации. **Третий** аспект надежности связан с безопасностью для людей и окружающей среды.

Очевидно, без знания основных вопросов математической теории надежности невозможно реализовать наилучшие условия проектирования технических систем и решить задачи безопасности при эксплуатации.

Методическое пособие составлено в соответствии с программой учебной дисциплины "Надежность технических систем и техногенный риск" для студентов, обучающихся по специальностям "Безопасность жизнедеятельности в техносфере" и "Инженерная защита окружающей Среды". Рассмотрение вопросов теории надежности ограничивается рассмотрением понятий, законов распределения отказов, способов резервирования, и основных методов расчета надежности систем до первого отказа.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

## 1.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В основу перечня положен ГОСТ 27.002-89 "Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения", формулирующий применяемые в науке и технике термины и определения в области надежности. Однако не все термины охватываются указанным ГОСТом, поэтому в отдельных пунктах введены дополнительные термины, отмеченные "звездочкой" (\*).

## 1.2. ОБЪЕКТ, ЭЛЕМЕНТ, СИСТЕМА

В теории надежности используют понятия *объект*, *элемент*, *система*.

**Объект** - техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Объектами могут быть различные системы и их элементы, в частности: сооружения, установки, технические изделия, устройства, машины, аппараты, приборы и их части, агрегаты и отдельные детали.

**Элемент системы** - объект, представляющий отдельную часть системы. Само понятие элемента условно и относительно, так как любой элемент, в свою очередь, всегда можно рассматривать как совокупность других элементов.

Понятия *система* и *элемент* выражены друг через друга, поскольку одно из них следовало бы принять в качестве исходного, постулировать. Понятия эти относительны: объект, считавшийся системой в одном исследовании, может рассматриваться как элемент, если изучается объект большего масштаба. Кроме того, само деление системы на элементы зависит от характера рассмотрения (функциональные, конструктивные, схемные или оперативные элементы), от требуемой точности проводимого исследования, от уровня наших представлений, от объекта в целом.

Человек-оператор также представляет собой одно из звеньев системы *человек-машина*.

**Система** - объект, представляющий собой совокупность элементов, связанных между собой определенными отношениями и

взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить выполнение системой некоторой достаточно сложной функции (рис. 1.1).

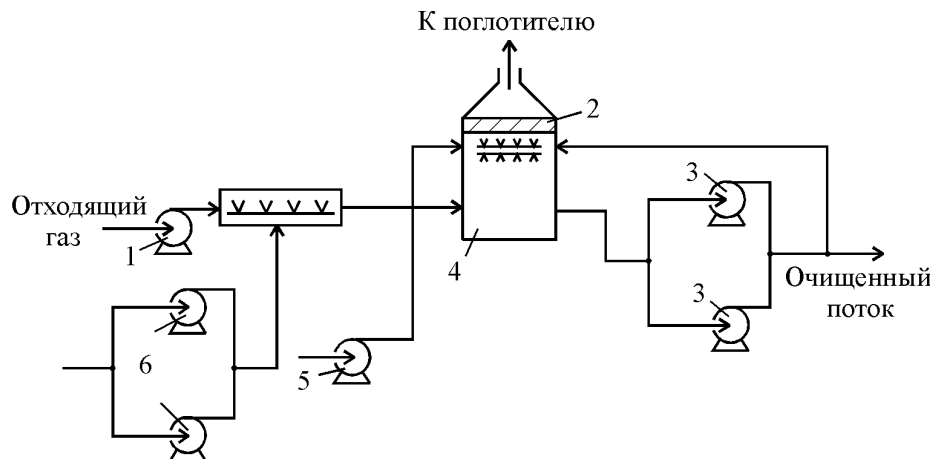


Рис. 1.1. Система охлаждения и очистки отработавшего газа: 1 - нагнетательный вентилятор; 2 - сетчатая прокладка; 3 - два циркуляционных насоса предварительной очистки газа; 4 - предварительный газоочиститель; 5 - водяной насос; 6 - два охлаждающих насоса

Признаком системности является структурированность системы, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели. Системы функционируют в пространстве и времени.

### 1.2.1. Состояние объекта

**Исправность** - состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

**Неисправность** - состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных НТД.

**Работоспособность** - состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных НТД.

Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач и устанавливаются в нормативно-технической документации.

**Неработоспособность** - состояние объекта, при котором значение хотя бы одного заданного параметра характеризующего

способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным НТД.

Понятие *исправность* шире, чем понятие *работоспособность*. Работоспособный объект в отличие от исправного удовлетворяет лишь тем требованиям НТД, которые обеспечивают его нормальное функционирование при выполнении поставленных задач.

Работоспособность и неработоспособность в общем случае могут быть полными или частичными. Полностью работоспособный объект обеспечивает в определенных условиях максимальную эффективность его применения. Эффективность применения в этих же условиях частично работоспособного объекта меньше максимально возможной, но значения ее показателей при этом еще находятся в пределах, установленных для такого функционирования, которое считается нормальным. Частично неработоспособный объект может функционировать, но уровень эффективности при этом ниже допустимого. Полностью неработоспособный объект применять по назначению невозможно.

Понятия частичной работоспособности и частичной неработоспособности применяют главным образом к сложным системам, для которых характерна возможность нахождения в нескольких состояниях. Эти состояния различаются уровнями эффективности функционирования системы. Работоспособность и неработоспособность некоторых объектов могут быть полными, т.е. они могут иметь только два состояния.

Работоспособный объект в отличие от исправного обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. При этом он может не удовлетворять, например, эстетическим требованиям, если ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его нормальному (эффективному) функционированию.

Очевидно, что работоспособный объект может быть неисправным, однако отклонения от требований НТД при этом не настолько существенны, чтобы нарушалось нормальное функционирование.

**Предельное состояние** - состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению должно быть прекращено из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого отклонения заданных параметров за установленные пределы, недопустимого увеличения эксплуатационных расходов или необходимости проведения капитального ремонта.



Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются НТД на данный объект.

Невосстанавливаемый объект достигает предельного состояния при возникновении отказа или при достижении заранее установленного предельно допустимого значения срока службы или суммарной наработки, устанавливаемых из соображений безопасности эксплуатации в связи с необратимым снижением эффективности использования ниже допустимой или в связи с увеличением интенсивности отказов, закономерным для объектов данного типа после установленного периода эксплуатации.

Для восстанавливаемых объектов переход в предельное состояние определяется наступлением момента, когда дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна вследствие следующих причин:

- становится невозможным поддержание его безопасности, безотказности или эффективности на минимально допустимом уровне;

- в результате изнашивания и (или) старения объект пришел в такое состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает необходимой степени восстановления исправности или ресурса.

Для некоторых восстанавливаемых объектов предельным состоянием считается такое, когда необходимое восстановление исправности может быть осуществлено только с помощью капитального ремонта.

**Режимная управляемость\*** - свойство объекта поддерживать нормальный режим посредством управления с целью сохранения или восстановления нормального режима его работы.

**Живучесть\*** - свойство объекта противостоять локальным возмущениям и отказам, не допуская их системного развития с массовыми отказами.

**Безопасность\*** - свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

### ***1.2.2. Переход объекта в различные состояния***

**Повреждение** - событие, заключающееся в нарушении исправности объекта при сохранении его работоспособности.

**Отказ** - событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

**Критерий отказа** - отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт отказа.

Признаки (критерии) отказов устанавливаются НТД на данный объект.

**Восстановление** - процесс обнаружения и устранения отказа (повреждения) с целью восстановления его работоспособности (исправности).

**Восстанавливаемый объект** - объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях.

**Невосстанавливаемый объект** - объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях.

При анализе надежности, особенно при выборе показателей надежности объекта, существенное значение имеет решение, которое должно быть принято в случае отказа объекта. Если в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособности данного объекта при его отказе по каким-либо причинам признается нецелесообразным или неосуществимым (например, из-за невозможности прерывания выполняемой функции), то такой объект в данной ситуации является невосстанавливаемым. Таким образом, один и тот же объект в зависимости от особенностей или этапов эксплуатации может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым. Например, аппаратура метеоспутника на этапе хранения относится к восстанавливаемой, а во время полета в космосе - невосстанавливаемой. Более того, даже один и тот же объект можно отнести к тому или иному типу в зависимости от назначения: ЭВМ, используемая для неоперативных вычислений, является объектом восстанавливаемым, так как в случае отказа любая операция может быть повторена, а та же ЭВМ, управляющая сложным технологическим процессом в химии, является объектом невосстанавливаемым, так как отказ или сбой приводит к непоправимым последствиям.

**Авария\*** - событие, заключающееся в переходе объекта с одного уровня работоспособности или относительного уровня функционирования на другой, существенно более низкий, с крупным нарушением режима работы объекта. Авария может привести к частичному или полному разрушению объекта, созданию опасных условий для человека и окружающей среды.

### **1.2.3. Временные характеристики объекта**

**Наработка** - продолжительность или объем работы объекта. Объект может работать непрерывно или с перерывами. Во втором случае учитывается суммарная наработка. Нарработка может измеряться в единицах времени, циклах, единицах выработки и др. единицах. В процессе эксплуатации различают суточную, месячную наработку, наработку до первого отказа, наработку между отказами, заданную наработку и т.д.

Если объект эксплуатируется в различных режимах нагрузки, то, например, наработка в облегченном режиме может быть выделена и учитываться отдельно от наработки при номинальной нагрузке.

**Технический ресурс** - наработка объекта от начала его эксплуатации до достижения предельного состояния.

Обычно указывается, какой именно технический ресурс имеется в виду: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего и т.п. Если конкретного указания не содержится, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех (средних и капитальных) ремонтов, т.е. до списания по техническому состоянию.

**Срок службы** - календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления после капитального или среднего ремонта до наступления предельного состояния.

Под **эксплуатацией** объекта понимается стадия его существования в распоряжении потребителя при условии применения объекта по назначению, что может чередоваться с хранением, транспортированием, техническим обслуживанием и ремонтом, если это осуществляется потребителем.

**Срок сохраняемости** - календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта в заданных условиях, в течение и после которой сохраняются значения установленных показателей (в том числе и показателей надежности) в заданных пределах.

## **1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ**

Работа любой технической системы может характеризоваться ее эффективностью (рис. 1.2), под которой понимается совокупность свойств, определяющих способность системы выполнять при ее создании определенные задачи.

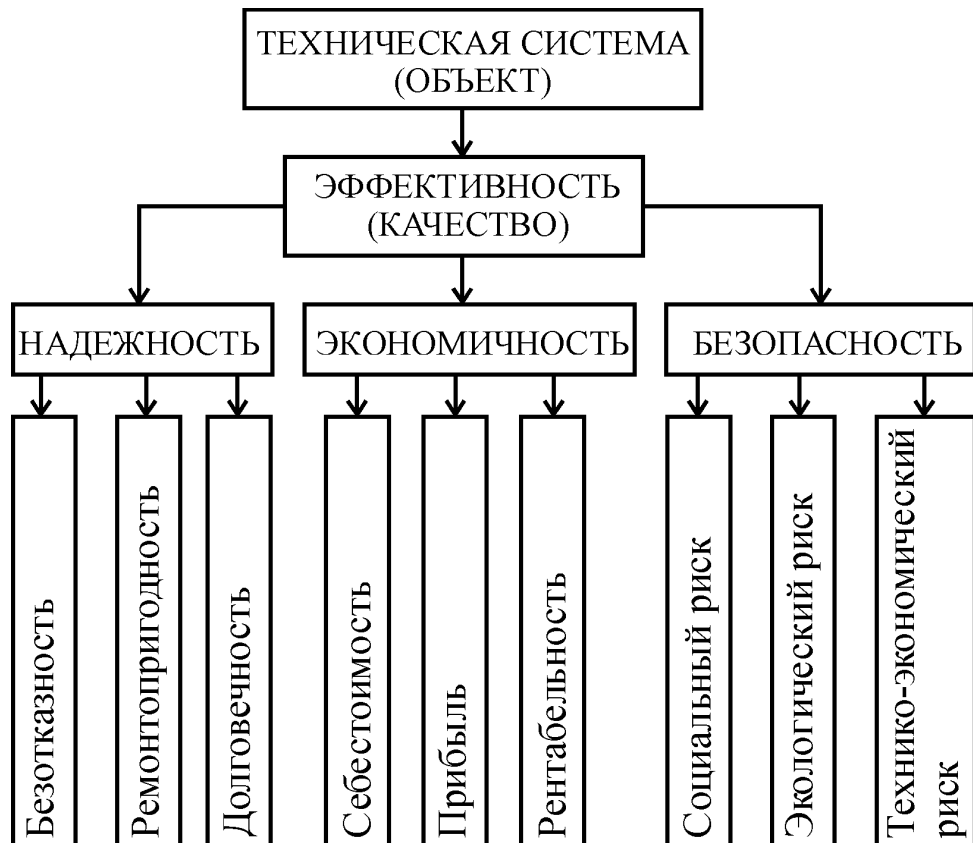


Рис. 1.2. Основные свойства технических систем

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 под **надежностью** понимают 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.

Таким образом:

1. Надежность - свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции. Например: для электродвигателя - обеспечивать требуемые момент на валу и скорость; для системы электроснабжения - обеспечивать электроприемники энергией требуемого качества.

2. Выполнение требуемых функций должно происходить при значениях параметров в установленных пределах. Например: для электродвигателя - обеспечивать требуемые момент и скорость при температуре двигателя, не превышающей определенного предела, отсутствии выделения источника взрыва, пожара и т.д.

3. Способность выполнять требуемые функции должна сохраняться в заданных режимах (например, в повторно-кратковременном режиме работы); в заданных условиях (например, в условиях запыленности, вибрации и т.д.).

4. Объект должен обладать свойством сохранять способность выполнять требуемые функции в различные фазы его жизни: при рабочей эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте, хранении и транспортировке.

Надежность - важный показатель качества объекта. Его нельзя ни противопоставлять, ни смешивать с другими показателями качества. Явно недостаточной, например, будет информация о качестве очистительной установки, если известно только то, что она обладает определенной производительностью и некоторым коэффициентом очистки, но неизвестно, насколько устойчиво сохраняются эти характеристики при ее работе. Бесполезна также информация о том, что установка устойчиво сохраняет присущие ей характеристики, но неизвестны значения этих характеристик. Вот почему в определение понятия надежности входит выполнение заданных функций и сохранение этого свойства при использовании объекта по назначению.

В зависимости от назначения объекта оно может включать в себя в различных сочетаниях безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Например, для невозстановливаемого объекта, не предназначенного для хранения, надежность определяется его безотказностью при использовании по назначению. Информация о безотказности восстанавливаемого изделия, длительное время находящегося в состоянии хранения и транспортировки, не в полной мере определяет его надежность (при этом необходимо знать и о ремонтпригодности, и сохраняемости). В ряде случаев очень важное значение приобретает свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния (снятие с эксплуатации, передача в средний или капитальный ремонт), т.е. необходима информация не только о безотказности объекта, но и о его долговечности.

Техническая характеристика, количественным образом определяющая одно или несколько свойств, составляющих надежность объекта именуется **показатель надежности**. Он количественно характеризует, в какой степени данному объекту или данной группе объектов присущи определенные свойства, обуславливающие надежность. Показатель надежности может иметь размерность (например, среднее время восстановления) или не иметь ее (например, вероятность безотказной работы).

Надежность в общем случае - комплексное свойство, включающее такие понятия, как безотказность, долговечность,

ремонтпригодность, сохраняемость. Для конкретных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость.

**Безотказность** - свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени.

**Ремонтпригодность** - свойство объекта быть приспособленным к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, к восстановлению работоспособности и исправности в процессе технического обслуживания и ремонта.

**Долговечность** - свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимым прерыванием для технического обслуживания и ремонтов.

**Сохраняемость** - свойство объекта непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение (и после) хранения и (или) транспортировки.

Для показателей надежности используются две формы представления: **вероятностная** и **статистическая**. Вероятностная форма обычно бывает удобнее при априорных аналитических расчетах надежности, статистическая - при экспериментальном исследовании надежности технических систем. Кроме того, оказывается, что одни показатели лучше интерпретируются в вероятностных терминах, а другие - в статистических.

### ***1.3.1. Показатели безотказности и ремонтпригодности***

**Наработка до отказа** - вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет (при условии работоспособности в начальный момент времени).

Для режимов хранения и транспортировки может применяться аналогично определяемый термин "**вероятность возникновения отказа**".

**Средняя наработка до отказа** - математическое ожидание случайной наработки объекта до первого отказа.

**Средняя наработка между отказами** - математическое ожидание случайной наработки объекта между отказами.

Обычно этот показатель относится к установившемуся процессу эксплуатации. В принципе средняя наработка между отказами объектов, состоящих из стареющих во времени элементов, зависит от номера предыдущего отказа. Однако с ростом номера отказа (т.е. с

увеличением длительности эксплуатации) эта величина стремится к некоторой постоянной, или, как говорят, к своему стационарному значению.

**Средняя наработка на отказ** - отношение наработки восстанавливаемого объекта за некоторый период времени к математическому ожиданию числа отказов в течение этой наработки.

Этим термином можно назвать кратко **среднюю наработку до отказа** и **среднюю наработку между отказами**, когда оба показателя совпадают. Для совпадения последних необходимо, чтобы после каждого отказа объект восстанавливался до первоначального состояния.

**Заданная наработка** - наработка, в течение которой объект должен безотказно работать для выполнения своих функций.

**Среднее время простоя** - математическое ожидание случайного времени вынужденного нерегламентированного пребывания объекта в состоянии неработоспособности.

**Среднее время восстановления** - математическое ожидание случайной продолжительности восстановления работоспособности (собственно ремонта).

**Вероятность восстановления** - вероятность того, что фактическая продолжительность восстановления работоспособности объекта не превысит заданной.

**Показатель технической эффективности функционирования** - мера качества собственно функционирования объекта или целесообразности использования объекта для выполнения заданных функций.

Этот показатель определяется количественно как математическое ожидание выходного эффекта объекта, т.е. в зависимости от назначения системы принимает конкретное выражение. Часто показатель эффективности функционирования определяется как полная вероятность выполнения объектом задачи с учетом возможного снижения качества его работы из-за возникновения частичных отказов.

**Коэффициент сохранения эффективности** - показатель, характеризующий влияние степени надежности к максимально возможному значению этого показателя (т.е. соответствующему состоянию полной работоспособности всех элементов объекта).

**Нестационарный коэффициент готовности** - вероятность того, что объект окажется работоспособным в заданный момент времени, отсчитываемый от начала работы (или от другого строго

определенного момента времени), для которого известно начальное состояние этого объекта.

**Средний коэффициент готовности** - усредненное на заданном интервале времени значение нестационарного коэффициента готовности.

**Стационарный коэффициент готовности (коэффициент готовности)** - вероятность того, что восстанавливаемый объект окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени в установившемся процессе эксплуатации. (Коэффициент готовности может быть определен и как отношение времени, в течение которого объект находится в работоспособном состоянии, к общей длительности рассматриваемого периода. Предполагается, что рассматривается установившийся процесс эксплуатации, математической моделью которого является стационарный случайный процесс. Коэффициент готовности является предельным значением, к которому стремятся и нестационарный, и средний коэффициенты готовности с ростом рассматриваемого интервала времени.

Часто используются показатели, характеризующие простой объект, - так называемые коэффициенты простоя соответствующего типа. Каждому коэффициенту готовности можно поставить в соответствие определенный **коэффициент простоя**, численно равный дополнению соответствующего коэффициента готовности до единицы. В соответствующих определениях работоспособность следует заменить на неработоспособность.

**Нестационарный коэффициент оперативной готовности** - вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в заданный момент времени, отсчитываемый от начала работы (или от другого строго определенного времени), и начиная с этого момента времени будет работать безотказно в течение заданного времени.

**Средний коэффициент оперативной готовности** - усредненное на заданном интервале значение нестационарного коэффициента оперативной готовности.

**Стационарный коэффициент оперативной готовности (коэффициент оперативной готовности)** - вероятность того, что восстанавливаемый элемент окажется работоспособным в произвольный момент времени, и с этого момента времени будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.



Предполагается, что рассматривается установившийся процесс эксплуатации, которому соответствуют в качестве математической модели стационарный случайный процесс.

**Коэффициент технического использования** - отношение средней наработки объекта в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме средних значений наработки, времени простоя, обусловленного техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации.

**Интенсивность отказов** - условная плотность вероятности отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

**Параметр потока отказов** - плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени.

Параметр потока отказа может быть определен как отношение числа отказов объекта за определенный интервал времени к длительности этого интервала при ординарном потоке отказов.

**Интенсивность восстановления** - условная плотность вероятности восстановления работоспособности объекта, определенная для рассматриваемого момента времени, при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

### **1.3.2. Показатели долговечности и сохраняемости**

**Гамма-процентный ресурс** - наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью  $1 - \gamma$ .

**Средний ресурс** - математическое ожидание ресурса.

**Назначенный ресурс** - суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

**Средний ремонтный ресурс** - средний ресурс между смежными капитальными ремонтами объекта.

**Средний ресурс до списания** - средний ресурс объекта от начала эксплуатации до его списания.

**Средний ресурс до капитального ремонта** - средний ресурс от начала эксплуатации объекта до его первого капитального ремонта.

**Гамма-процентный срок службы** - срок службы, в течение которого объект не достигает предельного состояния с вероятностью  $1 - \gamma$ .

**Средний срок службы** - математическое ожидание срока службы.

**Средний межремонтный срок службы** - средний срок службы между смежными капитальными ремонтами объекта.

**Средний срок службы до капитального ремонта** - средний срок службы от начала эксплуатации объекта до его первого капитального ремонта.

**Средний срок службы до списания** - средний срок службы от начала эксплуатации объекта до его списания.

**Гамма-процентный срок сохраняемости** - продолжительность хранения, в течение которой у объекта сохраняются установленные показатели с заданной вероятностью  $1 - \gamma$ .

**Средний срок сохраняемости** - математическое ожидание срока сохраняемости.

#### **1.4. ВИДЫ НАДЕЖНОСТИ**

Многоцелевое назначение оборудования и систем приводит к необходимости исследовать те или другие стороны надежности с учетом причин, формирующих надежность свойства объектов. Это приводит к необходимости подразделения надежности на виды. Различают:

- **аппаратурную надежность**, обусловленную состоянием аппаратов; в свою очередь она может подразделяться на надежность конструктивную, схемную, производственно-технологическую;

- **функциональную надежность**, связанную с выполнением некоторой функции (либо комплекса функций), возлагаемых на объект, систему;

- **эксплуатационную надежность**, обусловленную качеством использования и обслуживания;

- **программную надежность**, обусловленную качеством программного обеспечения (программ, алгоритмов действий, инструкций и т.д.);

- **надежность системы "человек-машина"**, зависящую от качества обслуживания объекта человеком-оператором.

#### **1.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТКАЗОВ**

Одним из основных понятий теории надежности является понятие отказа (объекта, элемента, системы).

**Отказ** объекта - событие, заключающееся в том, что объект полностью или частично перестает выполнять заданные функции. При полной потере работоспособности возникает **полный отказ**, при частичной - **частичный**. Понятия полного и частичного отказов каждый раз должны быть четко сформулированы перед анализом надежности, поскольку от этого зависит количественная оценка надежности.

По **причинам** возникновения отказов в данном месте различают:

- отказы из-за конструктивных дефектов;
- отказы из-за технологических дефектов;
- отказы из-за эксплуатационных дефектов;
- отказы из-за постепенного старения (износа).

Отказы вследствие конструктивных дефектов возникают как следствие несовершенства конструкции из-за "промахов" при конструировании. В этом случае наиболее распространенными являются недоучет "пиковых" нагрузок, применение материалов с низкими потребительскими свойствами, схемные "промахи" и др. Отказы этой группы сказываются на всех экземплярах изделия, объекта, системы.

Отказы из-за технологических дефектов возникают как следствие нарушения принятой технологии изготовления изделий (например, выход отдельных характеристик за установленные пределы). Отказы этой группы характерны для отдельных партий изделий, при изготовлении которых наблюдались нарушения технологии изготовления.

Отказы из-за эксплуатационных дефектов возникают по причине несоответствия требуемых условий эксплуатации, правил обслуживания действительным. Отказы этой группы характерны для отдельных экземпляров изделий.

Отказы из-за постепенного старения (износа) вследствие накопления необратимых изменений в материалах, приводящих к нарушению прочности (механической, электрической), взаимодействия частей объекта.

Отказы по **причинным схемам возникновения** подразделяются на следующие группы:

- отказы с мгновенной схемой возникновения;
- отказы с постепенной схемой возникновения;
- отказы с релаксационной схемой возникновения;
- отказы с комбинированными схемами возникновения.

Отказы с мгновенной схемой возникновения характеризуются тем, что время наступления отказа не зависит от времени предшествующей эксплуатации и состояния объекта, момент отказа наступает случайно, внезапно. Примерами реализации такой схемы могут служить отказы изделий под действием пиковых нагрузок в электрической сети, механическое разрушение посторонним внешним воздействием и т.п.

Отказы с постепенной схемой возникновения происходят за счет постепенного накопления вследствие физико-химических изменений в материалах повреждений. При этом значения некоторых "решающих" параметров выходят за допустимые границы и объект (система) не способен выполнять заданные функции. Примерами реализации постепенной схемы возникновения могут служить отказы вследствие снижения сопротивления изоляции, электрической эрозии контактов и т.п.

Отказы с релаксационной схемой возникновения характеризуются первоначальным постепенным накоплением повреждений, которые создают условия для скачкообразного (резкого) изменения состояния объекта, после которого возникает отказное состояние. Примерами реализации релаксационной схемы возникновения отказов могут служить пробой изоляции кабеля вследствие коррозионного разрушения брони.

Отказы с комбинированными схемами возникновения характерны для ситуаций, когда одновременно действуют несколько причинных схем. Примером, реализующим эту схему, может служить отказ двигателя в результате короткого замыкания по причинам снижения сопротивления изоляции обмоток и перегрева.

При анализе надежности необходимо выявлять преобладающие причины отказов и лишь затем, если в этом есть необходимость, учитывать влияние остальных причин.

По временному аспекту и степени предсказуемости отказы подразделяются на **внезапные** и **постепенные**.

По характеру устранения с течением времени различают **устойчивые (окончательные)** и **самоустраняющиеся (кратковременные)** отказы. Кратковременный отказ называется сбоям. Характерный признак сбоя - то, что восстановление работоспособности после его возникновения не требует ремонта аппаратуры. Примером может служить кратковременно действующая помеха при приеме сигнала, дефекты программы и т.п.

Для целей анализа и исследования надежности причинные схемы отказов можно представить в виде статистических моделей, которые вследствие вероятностного возникновения повреждений описываются вероятностными законами.

Указанные выше свойства технических объектов и промышленная безопасность – взаимосвязаны. Так, при неудовлетворительной надежности объекта вряд ли следует ожидать хороших показателей по его безопасности. В то же время, перечисленные свойства имеют свои самостоятельные функции. Если при анализе надежности изучается способность объекта выполнять заданные функции (при определенных условиях эксплуатации) в установленных пределах, то при оценке промышленной безопасности выявляют причинно-следственные связи возникновения и развития аварий и других нарушений с всесторонним анализом последствий этих нарушений.

## 2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

### 2.1. КРИТЕРИИ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

*Критерием надежности* называется признак, по которому можно количественно оценить надежность различных устройств.

К числу наиболее широко применяемых критериев надежности относятся:

- вероятность безотказной работы в течение определенного времени  $P(t)$ ;
- средняя наработка до первого отказа  $T_{cp}$ ;
- наработка на отказ  $t_{cp}$ ;
- частота отказов  $f(t)$  или  $a(t)$ ;
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ;
- параметр потока отказов  $\omega(t)$ ;
- функция готовности  $K_r(t)$ ;
- коэффициент готовности  $K_r$ .

*Характеристикой надежности* следует называть количественное значение критерия надежности конкретного устройства.

Выбор количественных характеристик надежности зависит от вида объекта.

#### 2.1.2. Критерии надежности невосстанавливаемых объектов

Рассмотрим следующую модель работы устройства.

Пусть в работе (на испытании) находится  $N_0$  элементов и пусть работа считается законченной, если все они отказали. Причем вместо отказавших элементов отремонтированные не ставятся. Тогда критериями надежности данных изделий являются:

- вероятность безотказной работы  $P(t)$ ;
- частота отказов  $f(t)$  или  $a(t)$ ;
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ;
- средняя наработка до первого отказа  $T_{cp}$ .

**Вероятностью безотказной работы** называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа.

Согласно определению

$$P(t) = P(T > t), \quad (2.1)$$

где  $T$  - время работы элемента от его включения до первого отказа;  $t$  - время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$\bar{P}(t) = [N_0 - n(t)] / N_0, \quad (2.2)$$

где  $N_0$  - число элементов в начале работы (испытаний);  $n(t)$  - число отказавших элементов за время  $t$ ;  $\bar{P}(t)$  - статистическая оценка вероятности безотказной работы. При большом числе элементов (изделий)  $N_0$  статистическая оценка  $\bar{P}(t)$  практически совпадает с вероятностью безотказной работы  $P(t)$ . На практике иногда более удобной характеристикой является вероятность отказа  $Q(t)$ .

**Вероятностью отказа** называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникает хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа являются событиями несовместными и противоположными, поэтому

$$Q(t) = P(T \leq t), \quad \bar{Q}(t) = n(t) / N_0, \quad Q(t) = 1 - P(t). \quad (2.3)$$

**Частотой отказов** по статистическим данным называется отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу работающих (испытываемых) при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются.

Согласно определению

$$\bar{f}(t) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t, \quad (2.4)$$

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

**Частота отказов** есть плотность вероятности (или закон распределения) времени работы изделия до первого отказа. Поэтому

$$P(t) = 1 - Q(t), \quad P(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt. \quad (2.5)$$

**Интенсивность отказов** по статистическим данным называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

Согласно определению

$$\bar{\lambda}(t) = n(\Delta t) / (N_{cp}\Delta t), \quad (2.6)$$

где  $N_{cp} = (N_i + N_{i+1}) / 2$  - среднее число исправно работающих элементов в интервале  $\Delta t$ ;  $N_i$  - число изделий, исправно работающих в начале интервала  $\Delta t$ ;  $N_{i+1}$  - число элементов исправно работающих в конце интервала  $\Delta t$ .

Вероятностная оценка характеристики  $\lambda(t)$  находится из выражения

$$\lambda(t) = f(t) / P(t). \quad (2.7)$$

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right). \quad (2.8)$$

**Средней наработкой до первого отказа** называется математическое ожидание времени работы элемента до отказа.

Как математическое ожидание,  $T_{cp}$  вычисляется через частоту отказов (плотность распределения времени безотказной работы):

$$M[t] = T_{cp} = \int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt. \quad (2.9)$$

Так как  $t$  положительно и  $P(0)=1$ , а  $P(\infty)=0$ , то

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (2.10)$$



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

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \left( \sum_{i=1}^{N_0} t_i \right) / N_0. \quad (2.11)$$

где  $t_i$  - время безотказной работы  $i$ -го элемента;  $N_0$  - число исследуемых элементов.

Как видно из формулы (2.11), для определения средней наработки до первого отказа необходимо знать моменты выхода из строя всех испытуемых элементов. Поэтому для вычисления средней наработки на отказ  $\bar{T}_{\text{ср}}$  пользоваться указанной формулой неудобно. Имея данные о количестве вышедших из строя элементов  $n_i$  в каждом  $i$ -м интервале времени, среднюю наработку до первого отказа лучше определять из уравнения

$$\bar{T}_{\text{ср}} \approx \left( \sum_{i=1}^m n_i t_{\text{ср}i} \right) / N_0. \quad (2.12)$$

В выражении (2.12)  $t_{\text{ср}i}$  и  $m$  находятся по следующим формулам:

$$t_{\text{ср}i} = (t_{i-1} + t_i) / 2, \quad m = t_k / \Delta t,$$

где  $t_{i-1}$  - время начала  $i$ -го интервала;  $t_i$  - время конца  $i$ -го интервала;  $t_k$  - время, в течение которого вышли из строя все элементы;  $\Delta t = t_{i-1} - t_i$  - интервал времени.

Из выражений для оценки количественных характеристик надежности видно, что все характеристики, кроме средней наработки до первого отказа, являются функциями времени. Конкретные выражения для практической оценки количественных характеристик надежности устройств рассмотрены в разделе "Законы распределения отказов".

Рассмотренные критерии надежности позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемых изделий. Они также позволяют оценить **надежность восстанавливаемых изделий до первого отказа**. Наличие нескольких критериев вовсе не означает, что всегда нужно оценивать надежность элементов по всем критериям.

Наиболее полно надежность изделий характеризуется частотой отказов  $f(t)$  или  $a(t)$ . Это объясняется тем, что частота отказов

является плотностью распределения, а поэтому несет в себе всю информацию о случайном явлении - времени безотказной работы.

Средняя наработка до первого отказа является достаточно наглядной характеристикой надежности. Однако применение этого критерия для оценки надежности сложной системы ограничено в тех случаях, когда:

- время работы системы гораздо меньше среднего времени безотказной работы;
- закон распределения времени безотказной работы не однопараметрический и для достаточно полной оценки требуются моменты высших порядков;
- система резервированная;
- интенсивность отказов не постоянная;
- время работы отдельных частей сложной системы разное.

Интенсивность отказов - наиболее удобная характеристика надежности простейших элементов, так как она позволяет более просто вычислять количественные характеристики надежности сложной системы.

Наиболее целесообразным критерием надежности сложной системы является вероятность безотказной работы. Это объясняется следующими особенностями вероятности безотказной работы:

- она входит в качестве сомножителя в другие, более общие характеристики системы, например, в эффективность и стоимость;
- характеризует изменение надежности во времени;
- может быть получена сравнительно просто расчетным путем в процессе проектирования системы и оценена в процессе ее испытания.

### ***2.1.3. Критерии надежности восстанавливаемых объектов***

Рассмотрим следующую модель работы.

Пусть в работе находится  $N$  элементов и пусть отказавшие элементы немедленно заменяются исправными (новыми или отремонтированными). Если не учитывать времени, потребного на восстановление системы, то количественными характеристиками надежности могут быть параметр потока отказов  $\omega(t)$  и наработка на отказ  $t_{cp}$ .

***Параметром потока отказов*** называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к числу испытываемых при

условии, что все вышедшие из строя изделия заменяются исправными (новыми или отремонтированными).

Статистическим определением служит выражение

$$\bar{\omega}(t) = n(\Delta t) / N\Delta t, \quad (2.13)$$

где  $n(\Delta t)$  - число отказавших образцов в интервале времени от  $t-\Delta t/2$  до  $t+\Delta t/2$ ;  $N$  - число испытываемых элементов;  $\Delta t$  - интервал времени.

Параметр потока отказов и частота отказов для ординарных потоков с ограниченным последствием связаны интегральным уравнением Вольтера второго рода

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau)f(t - \tau)d\tau . \quad (2.14)$$

По известной  $f(t)$  можно найти все количественные характеристики надежности невосстанавливаемых изделий. Поэтому (2.14) является основным уравнением, связывающим количественные характеристики надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых элементов при мгновенном восстановлении.

Уравнение (2.14) можно записать в операторной форме:

$$\omega(s) = \frac{f(s)}{1 - f(s)}, \quad f(s) = \frac{\omega(s)}{1 + \omega(s)}. \quad (2.15)$$

Соотношения (2.15) позволяют найти одну характеристику через другую, если существуют преобразования Лапласа функций  $f(s)$  и  $\omega(s)$  и обратные преобразования выражений (2.15).

Параметр потока отказов обладает следующими важными свойствами:

1) для любого момента времени независимо от закона распределения времени безотказной работы параметр потока отказов больше, чем частота отказов, т.е.  $\omega(t) > f(t)$ ;

2) независимо от вида функций  $f(t)$  параметр потока отказов  $\omega(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  стремится к  $1/T_{cp}$ . Это важное свойство параметра потока отказов означает, что при длительной эксплуатации ремонтируемого изделия поток его отказов независимо от закона распределения времени безотказной работы становится стационарным. Однако это вовсе не означает, что интенсивность отказов есть величина постоянная;

3) если  $\lambda(t)$  - возрастающая функция времени, то  $\lambda(t) > \omega(t) > f(t)$ ,  
если  $\lambda(t)$  - убывающая функция, то  $\omega(t) > \lambda(t) > f(t)$ ;

4) при  $\lambda(t) \neq \text{const}$  параметр потока отказов системы не равен сумме параметров потока отказов элементов, т.е.

$$\omega_c(t) \neq \sum_{i=1}^N \omega_i(t). \quad (2.16)$$

Это свойство параметра потока отказов позволяет утверждать, что при вычислении количественных характеристик надежности сложной системы нельзя суммировать имеющиеся в настоящее время значения интенсивности отказов элементов, полученных по статистическим данным об отказах изделий в условиях эксплуатации, так как указанные величины являются фактически параметрами потока отказов;

5) при  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$  параметр потока отказов равен интенсивности отказов  $\omega(t) = \lambda(t) = \lambda$ .

Из рассмотрения свойств интенсивности и параметра потока отказов видно, что эти характеристики различны.

В настоящее время широко используются статистические данные об отказах, полученные в условиях эксплуатации оборудования. При этом они часто обрабатываются таким образом, что приводимые характеристики надежности являются не интенсивностью отказов, а параметром потока отказов  $\omega(t)$ . Это вносит ошибки при расчетах надежности. В ряде случаев они могут быть значительными.

Для получения интенсивности отказов элементов из статистических данных об отказах ремонтируемых систем необходимо воспользоваться формулой (2.6), для чего необходимо знать предысторию каждого элемента технологической схемы. Это может существенно усложнить методику сбора статистических данных об отказах. Поэтому целесообразно определять  $\lambda(t)$  по параметру потока отказов  $\omega(t)$ . Методика расчета сводится к следующим вычислительным операциям:

- по статистическим данным об отказах элементов ремонтируемых изделий и по формуле (2.13) вычисляется параметр потока отказов и строится гистограмма  $\omega_i(t)$ ;

- гистограмма заменяется кривой, которая аппроксимируется уравнением;

- находится преобразование Лапласа  $\omega_i(s)$  функции  $\omega_i(t)$ ;
- по известной  $\omega_i(s)$  на основании (2.15) записывается преобразование Лапласа  $f_i(s)$  частоты отказов;
- по известной  $f_i(s)$  находится обратное преобразование частоты отказов  $f_i(t)$ ;
- находится аналитическое выражение для интенсивности отказов по формуле

$$\lambda_i(t) = f_i(t) / \left( 1 - \int_0^t f_i(t) dt \right); \quad (2.17)$$

- строится график  $\lambda_i(t)$ .

Если имеется участок, где  $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$ , то постоянное значение интенсивности отказов принимается для оценки вероятности безотказной работы. При этом считается справедливым экспоненциальный закон надежности.

Приведенная методика не может быть применена, если не удастся найти по  $f(s)$  обратное преобразование частоты отказов  $f(t)$ . В этом случае приходится применять приближенные методы решения интегрального уравнения (2.14).

**Наработкой на отказ** называется среднее значение времени между соседними отказами.

Эта характеристика определяется по статистическим данным об отказах по формуле

$$\bar{t}_{\text{cp}} = \left( \sum_{i=1}^n t_i \right) / n, \quad (2.18)$$

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

Из формулы (2.18) видно, что в данном случае наработка на отказ определяется по данным испытания одного образца изделия. Если на испытании находится  $N$  образцов в течение времени  $t$ , то наработка на отказ вычисляется по формуле

$$\bar{t}_{\text{cp}} = \left( \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} \right) / \sum_{j=1}^N n_j, \quad (2.19)$$

где  $t_{ij}$  - время исправной работы  $j$ -го образца изделия между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м отказом;  $n_j$  - число отказов за время  $t$   $j$ -го образца.

Наработка на отказ является достаточно наглядной характеристикой надежности, поэтому она получила широкое распространение на практике.

Параметр потока отказов и наработка на отказ характеризуют надежность восстанавливаемого изделия и не учитывают времени, необходимого на его восстановление. Поэтому они не характеризуют готовности устройства к выполнению своих функций в нужное время. Для этой цели вводятся такие критерии, как коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя.

**Коэффициентом готовности** называется отношение времени исправной работы к сумме времен исправной работы и вынужденных простоев устройства, взятых за один и тот же календарный срок. Эта характеристика по статистическим данным определяется

$$\bar{K}_r = t_p / (t_p + t_n), \quad (2.20)$$

где  $t_p$  - суммарное время исправной работы изделия;  $t_n$  - суммарное время вынужденного простоя.

Времена  $t_p$  и  $t_n$  вычисляются по формулам

$$t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi}; \quad t_n = \sum_{i=1}^n t_{ni}, \quad (2.21)$$

где  $t_{pi}$  - время работы изделия между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м отказом;  $t_{ni}$  - время вынужденного простоя после  $i$ -го отказа;  $n$  - число отказов (ремонтов) изделия.

Для перехода к вероятностной трактовке величины  $t_p$  и  $t_n$  заменяются математическими ожиданиями времени между соседними отказами и времени восстановления соответственно. Тогда

$$K_r = t_{cp} / (t_{cp} + t_b), \quad (2.22)$$

где  $t_{cp}$  - наработка на отказ;  $t_b$  - среднее время восстановления.

**Коэффициентом вынужденного простоя** называется отношение времени вынужденного простоя к сумме времен исправной работы и вынужденных простоев изделия, взятых за один и тот же календарный срок.

Согласно определению

$$\bar{K}_n = t_p / (t_p + t_n) \quad (2.23)$$

или, переходя к средним величинам,

$$K_n = t_B / (t_{cp} + t_B). \quad (2.24)$$

Коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя связаны между собой зависимостью

$$K_n = 1 - K_r. \quad (2.25)$$

При анализе надежности восстанавливаемых систем обычно коэффициент готовности вычисляют по формуле

$$K_r = T_{cp} / (T_{cp} + t_B). \quad (2.26)$$

Формула (2.26) верна только в том случае, если поток отказов простейший, и тогда  $t_{cp} = T_{cp}$ .

Часто коэффициент готовности, вычисленный по формуле (2.26), отождествляют с вероятностью того, что в любой момент времени восстанавливаемая система исправна. На самом деле указанные характеристики неравноценны и могут быть отождествлены при определенных допущениях.

Действительно, вероятность возникновения отказа ремонтируемой системы в начале эксплуатации мала. С ростом времени  $t$  эта вероятность возрастает. Это означает, что вероятность застать систему в исправном состоянии в начале эксплуатации будет выше, чем после истечения некоторого времени. Между тем на основании формулы (2.26) коэффициент готовности не зависит от времени работы.

Для выяснения физического смысла коэффициента готовности  $K_r$  запишем формулу для вероятности застать систему в исправном состоянии. При этом рассмотрим наиболее простой случай, когда интенсивность отказов  $\lambda$  и интенсивность восстановления  $\mu$  есть величины постоянные.

Предполагая, что при  $t=0$  система находится в исправном состоянии ( $P(0)=1$ ), вероятность застать систему в исправном состоянии определяется из выражений

$$P_r(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp [-(\lambda + \mu)t];$$

$$P_r(t) = K_r + (1 - K_r) \exp (-t/K_{rt_B}),$$
(2.27)

где  $\lambda = 1 / T_{cp}$ ;  $\mu = 1 / t_B$ ;  $K_r = T_{cp} / (T_{cp} + t_B)$ .

Это выражение устанавливает зависимость между коэффициентом готовности системы и вероятностью застать ее в исправном состоянии в любой момент времени  $t$ .

Из (2.27) видно, что  $P_r(t) \rightarrow K_r$  при  $t \rightarrow \infty$ , т.е. практически коэффициент готовности имеет смысл вероятности застать изделие в исправном состоянии при установившемся процессе эксплуатации.

В некоторых случаях критериями надежности восстанавливаемых систем могут быть критерии невозстанавливаемых систем, например: **вероятность безотказной работы, частота отказов, средняя наработка до первого отказа, интенсивность отказов**. Такая необходимость возникает:

- когда имеет смысл оценивать надежность восстанавливаемой системы до первого отказа;
- в случае, когда применяется резервирование с восстановлением отказавших резервных устройств в процессе работы системы, причем отказ всей резервированной системы не допускается.



### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ

Отказы в системах возникают под воздействием разнообразных факторов. Поскольку каждый фактор в свою очередь зависит от многих причин, то отказы элементов, входящих в состав системы, относятся, как правило, к случайным событиям, а время работы до возникновения отказов - к случайным величинам. В инженерной практике возможны и не случайные (детерминированные) отказы (отказы, возникновение которых происходит в определенный момент времени, т.е. в момент возникновения причины, так как существует однозначная и определенная связь между причиной отказа и моментом его возникновения). Например, если в цепи аппаратов ошибочно поставлен элемент, не способный работать при пиковой нагрузке, то всякий раз когда возникает эта нагрузка, он обязательно перейдет в отказовое состояние. Такие отказы выявляются и устраняются в процессе проверки технической документации и испытаний.

При анализе надежности объектом исследования являются случайные события и величины. В качестве теоретических распределений наработки до отказа могут быть использованы любые применяемые в теории вероятностей непрерывные распределения. В принципе можно взять любую кривую, площадь под которой равна единице, и использовать ее в качестве кривой распределения случайной величины. Поэтому прежде чем приступить к инженерным методам расчета надежности и испытаний на надежность, следует рассмотреть закономерности, которым они подчиняются.

#### 3.1. СЛУЧАЙНОЕ СОБЫТИЕ

*Случайное событие* - событие (факт, явление), которое в результате опыта может произойти или не произойти. Случайные события (отказы, восстановления, заявки на обслуживание и др.) образуют случайные потоки и случайные процессы. **Поток событий** - последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то отрезки времени. Например, отказы восстанавливаемого устройства образуют поток событий (поток отказов). Под действием потока отказов и потока восстановлений техническое устройство может находиться в различных состояниях (полного отказа, частичного отказа, работоспособное). Переход

изделия из одного состояния в другое представляет собой *случайный процесс*.

### 3.2. СЛУЧАЙНАЯ ВЕЛИЧИНА

**Случайная величина** - величина, которая в результате опыта может принимать то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно. Случайная величина может быть *дискретной* (число отказов за время  $t$ , число отказавших элементов при наработке заданного объема и т.д.), либо непрерывной (время наработки элемента до отказа, время восстановления работоспособности).

**Закон распределения случайной величины** - соотношение, устанавливающее связь между значениями случайной величины и их вероятностями. Он может быть представлен формулой, таблицей, многоугольником распределений.

Для характеристики случайной величины (непрерывной и дискретной) используется вероятность того, что случайная величина  $X$  меньше некоторой текущей переменной  $x$ .

**Функция распределения случайной величины  $X$  (интегральный закон распределения)** - функция вида  $F(x) = P(X < x)$ .

**Плотность распределения непрерывной случайной величины  $X$  (дифференциальный закон распределения)** - производная от функции распределения:

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x); \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1; \quad \int_{-\infty}^x f(x) dx = F(x). \quad (3.1)$$

В теории надежности за случайную величину обычно принимают время работы изделия (время до возникновения отказа). В этом случае функция плотности распределения  $f(t)$  будет служить полной характеристикой рассеивания сроков службы элементов (рис. 3.1). Вид этой функции зависит от закономерностей процесса потери элементом работоспособности.

Кривая распределения  $f(t)$  - частота отказов - дает возможность подсчитать средний срок службы элемента  $T_{cp}$  (математическое ожидание  $M[t]$ ), рассеивание (дисперсию  $D$ ) этих сроков службы относительно центра группирования и другие числовые параметры случайной величины  $T$ .

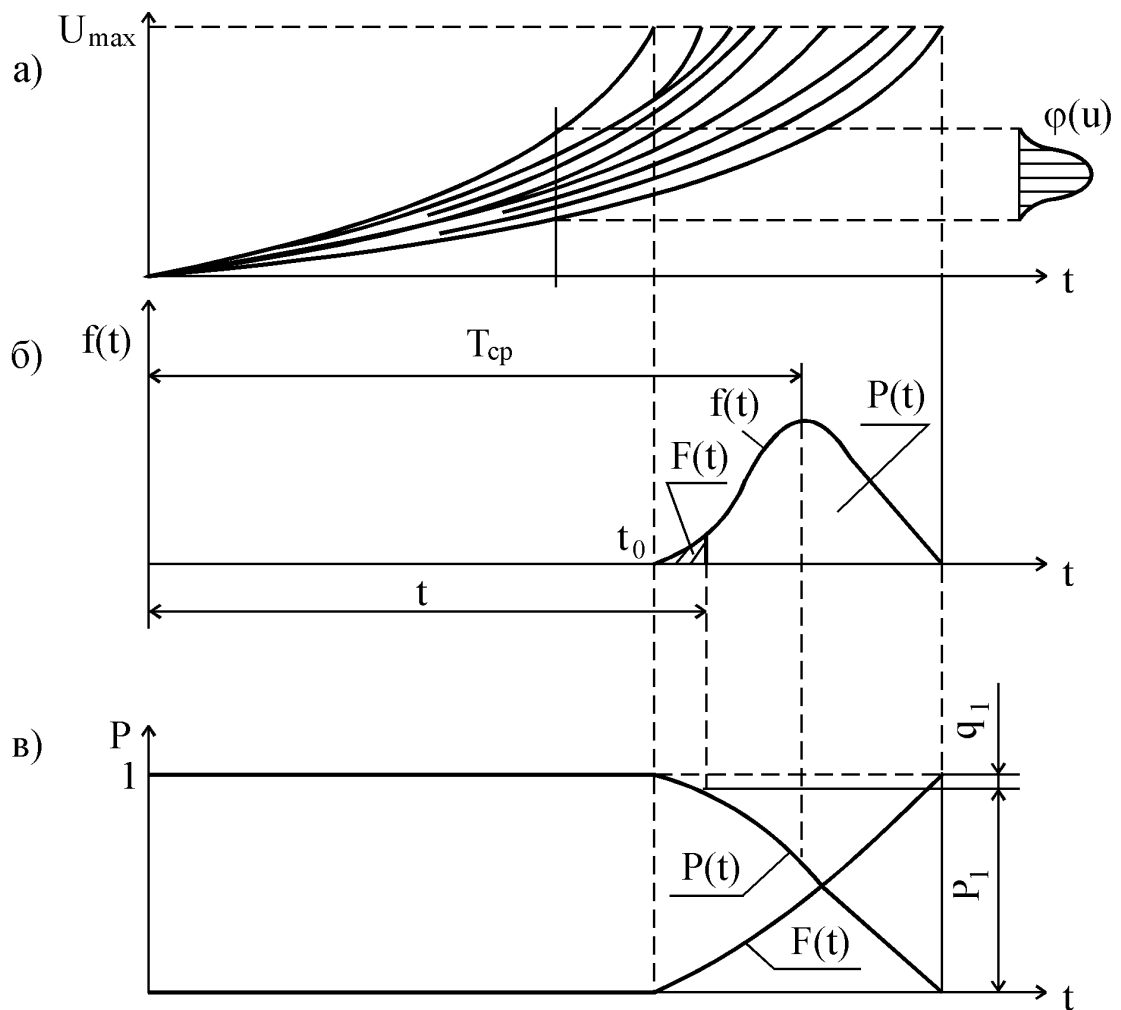


Рис. 3.1. Кривые распределения случайной величины при износных (постепенных) отказах: а - реализация функции износа  $\varphi(U)$ ; б - плотность распределения сроков службы  $f(t)$ ; в - интегральная функция распределения  $F(t)$  и вероятность безотказной работы  $P(t)$

Если взять некоторый период времени работы элемента  $t$ , то площадь  $F(t)$  кривой распределения  $f(t)$  будет характеризовать вероятность отказа (выхода из строя) элемента за этот период времени (рис. 3.1,б). Поэтому левая ветвь кривой распределения  $f(t)$ , относящаяся к области малой вероятности отказов, используется обычно для характеристики безотказности работы изделия, а вся кривая  $f(t)$  и ее параметры необходимы для оценки его долговечности.

Ординаты интегральной функции распределения  $F(t)$  (рис. 3.1,в) характеризуют вероятность отказа детали до данного момента времени

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt.$$

Во многих случаях нет необходимости пользоваться функциями  $F(t)$  или  $f(t)$ , достаточно знать числовые характеристики этих кривых.

Основной характеристикой положения кривой  $f(t)$  является математическое ожидание  $M[t]$ , которое в нашем случае является средним сроком службы  $T_{cp}$  (наработкой на отказ):

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

Основной характеристикой рассеивания случайной величины является дисперсия  $D$  или среднее квадратическое отклонение  $\sigma = \sqrt{D}$

$$D(t) = \int_0^{\infty} (T_{cp} - t)^2 f(t)dt.$$

Чем больше значение  $D$  (или соответственно  $\sigma$ ), тем больше рассеивание сроков службы относительно их среднего значения  $M[t]$ .

Для оценки надежности работы элемента, принимая за основную случайную величину время до возникновения отказа, можно определить и вероятность безотказной работы  $P(t)$  в пределах заданного периода  $t$ . Для этого воспользуемся значением интегральной функции

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt.$$

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  относится к событию, противоположному появлению отказа  $F(t)$ . Поэтому  $F(t)+P(t)=1$  или  $P(t)=1-F(t)$ . Следовательно,  $P(t)$  определяется (2.5).

В этом случае:

функция распределения отказа  $F(t) = P(t < t_{зад}) = Q(t)$ ;

плотность распределения  $f(t) = dQ(t)/dt$ ;

вероятность безотказности изделия за время  $t$   $P(t)=1-Q(t)$ .

**Интенсивность отказов (условная плотность вероятности отказов)** - отношение  $f(t)$  к  $P(t)$ , см. (2.7):

$$\lambda(t) = f(t) / P(t).$$

Типичная функция интенсивности отказов изображена на рис. 3.2.

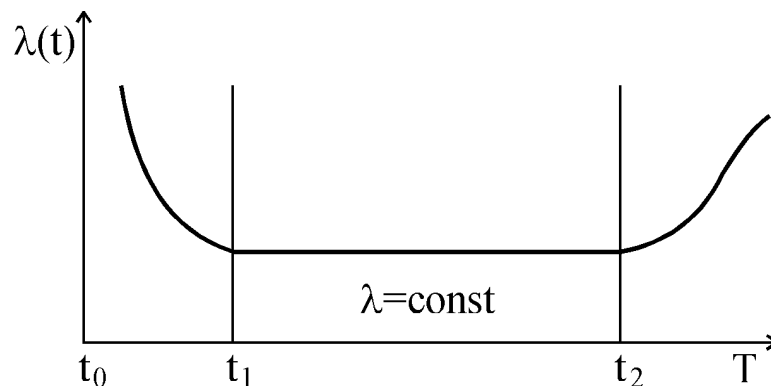


Рис. 3.2. Типичная функция интенсивности отказов

Участок убывающей интенсивности отказов ( $t_0-t_1$ ) иногда называют **периодом приработки** или **периодом ранних отказов**. Появление отказов в этом периоде обычно вызывается конструктивными или производственными дефектами.

Участок постоянной интенсивности отказов ( $t_1-t_2$ ) называют **периодом нормальной эксплуатации**. Этот период начинается сразу же после периода приработки и заканчивается непосредственно перед **периодом износных отказов**.

Период износных отказов начинается тогда, когда элемент (устройство) выработал свой ресурс, вследствие чего число отказов в этом периоде начинает возрастать.

Отказы, появляющиеся в периоде нормальной эксплуатации, называют **внезапными**, так как они появляются в случайные моменты времени, или, другими словами, внезапно, непредсказуемо.

### 3.3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

В теории надежности наибольшее распространение получили следующие законы распределения случайных величин  $f(t)$ :

для дискретных случайных величин - биномиальный закон; закон Пуассона;

для непрерывных случайных величин - экспоненциальный закон; нормальный закон; гамма-распределение; закон Вейбулла;  $\chi^2$  - распределение; логарифмически-нормальное распределение.

Биномиальный закон распределения числа  $n$  появления события  $A$  в  $m$  независимых опытах (испытаниях). Если вероятность появления события  $A$  в одном испытании равна  $p$ , вероятность не появления события  $A$  равна  $q=1-p$ ; число независимых испытаний равно  $m$ , то вероятность появления  $n$  событий в испытаниях будет

$$P_m^n = C_m^n p^n (1-p)^{m-n}, \quad (3.2)$$

где  $C_m^n$  - число сочетаний из  $m$  по  $n$ .

Свойства распределения следующие:

- 1) число событий  $n$  - целое положительное число;
- 2) математическое ожидание числа событий равно  $mp$ ;
- 3) среднеквадратическое отклонение числа событий

$$\sigma = \sqrt{mp(1-p)}.$$

При увеличении числа испытаний биномиальное распределение приближается к нормальному со средним значением  $n/m$  и дисперсией  $p(1-p)/m$ .

**Закон Пуассона** - распределение чисел случайного события  $n$ ; за время  $\tau$ . Вероятность возникновения случайного события  $n$  раз за время  $\tau$

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \exp(-\lambda\tau), \quad (3.3)$$

где  $\lambda$  - интенсивность случайного события.

Свойства распределения следующие:

- 1) математическое ожидание числа событий за время  $\tau$  равно  $\lambda\tau$ ;
- 2) среднеквадратическое отклонение числа событий

$$\sigma = \sqrt{\lambda\tau}.$$

Характерный признак распределения Пуассона - равенство математического ожидания и дисперсии. Это свойство используется для проверки степени соответствия исследуемого (опытного) распределения с распределением Пуассона.

Распределение Пуассона получается из биномиального распределения, если число испытаний  $m$  неограниченно возрастает, а математическое ожидание числа событий  $a=\lambda\tau$  остается постоянным.

Тогда вероятность  $P_m^n$  биномиального распределения при каждом  $n$ , равном  $0, 1, 2, \dots$ , стремится к пределу

$$P_m^n \rightarrow \frac{(a)^n}{n!} \exp(-a).$$

Закон Пуассона используется тогда, когда необходимо определить вероятность того, что в изделии за заданное время произойдет один, два, три и т.д. отказов.

Экспоненциальный (показательный) закон распределения случайной величины  $X$  (рис. 3.3,а) записывается в общем случае так:

$$P(x) = \exp(-\lambda x),$$

где  $P(x)$  - вероятность того, что случайная величина  $X$  имеет значение больше  $x$ ; значения  $e^{-x}$  даются в прилож. 1.

В частном случае, когда за случайную величину принимается время работы объекта  $t$ , вероятность того, что изделие на протяжении времени  $t$  будет находиться в работоспособном состоянии, равна  $\exp(-\lambda t)$ :

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \tag{3.4}$$

где  $\lambda$  - интенсивность отказов объекта для экспоненциального распределения (она постоянна), т.е  $\lambda = \text{const}$ .

Выражение (3.4) можно получить непосредственно из (3.3), если число отказов  $n$  принять равным 0.

Вероятность отказа за время  $t$  из (3.4)

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \exp(-\lambda t). \tag{3.5}$$

Плотность вероятности отказов

$$f(t) = \partial Q / \partial t = \lambda \exp(-\lambda t). \tag{3.6}$$

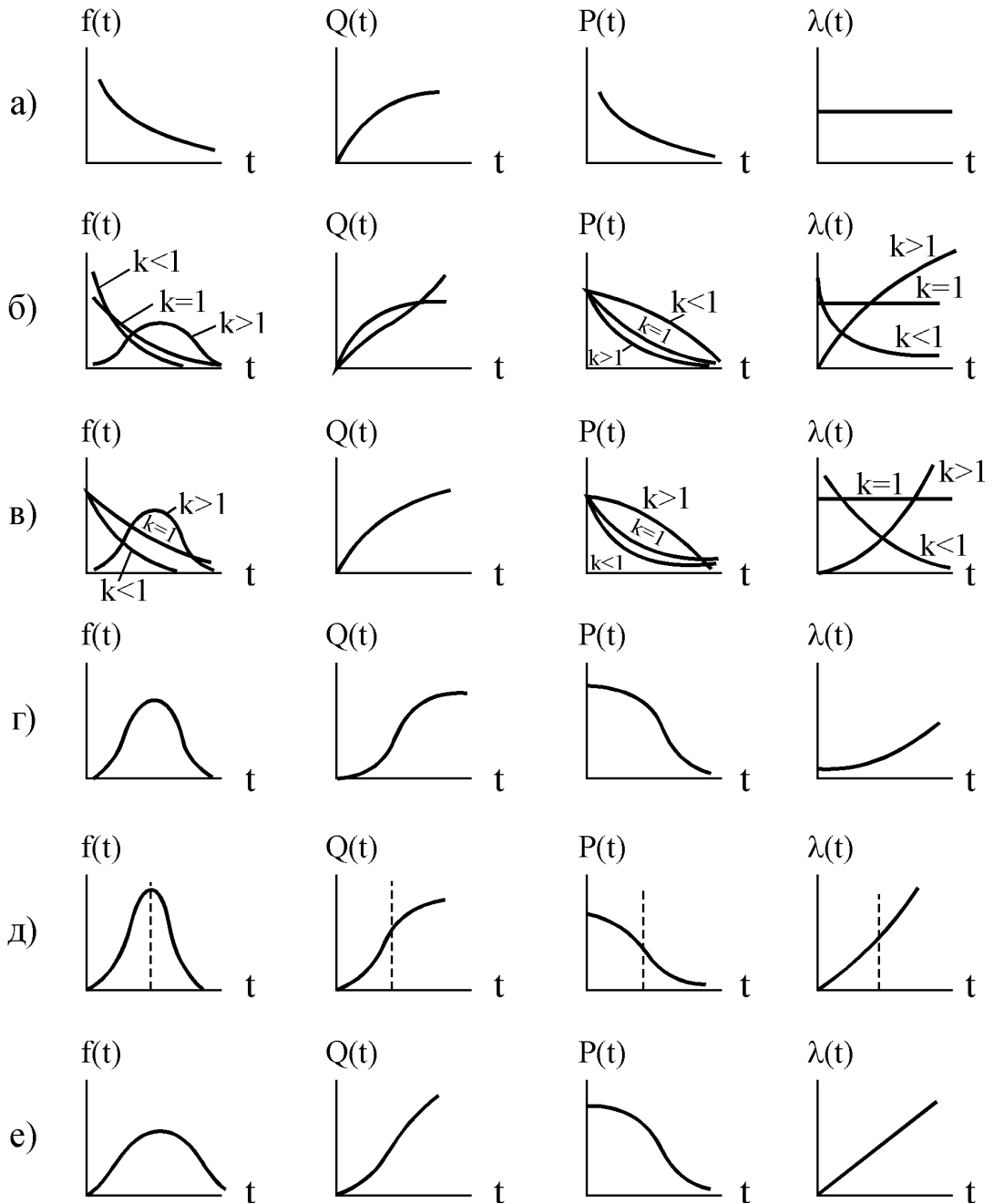


Рис. 3.3. Распределения: а – экспоненциальное; б -  $\gamma$ -распределение; в - Вейбулла; г - нормальное; д - усеченное нормальное; е - Рэлея

Среднее время работы до возникновения отказа

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt = 1/\lambda. \quad (3.7)$$

Дисперсия времени работы до возникновения отказа



$$D(t) = \int_0^{\infty} (t - T_1)^2 f(t) dt = 1/\lambda^2. \quad (3.8)$$

Среднеквадратическое время работы

$$\sigma(t) = T_1.$$

Равенство среднеквадратического отклонения среднему времени работы - характерный признак экспоненциального распределения.

Статистические материалы об отказах элементов свидетельствуют о том, что в основном время их работы подчиняется экспоненциальному закону распределения. Условием возникновения экспоненциального закона распределения времени до отказа служит постоянство интенсивности отказов, что характерно для внезапных отказов на интервале времени, когда период приработки объекта закончился, а период износа и старения еще не начался, т.е. для нормальных условий эксплуатации. Постоянной становится интенсивность отказов сложных объектов, если вызываются они отказами большого числа комплектующих элементов.

Время возникновения первичных отказов может быть расположено на оси времени так, что суммарный поток отказов сложного изделия становится близким к простейшему, т.е. с постоянной интенсивностью отказов.

Этими обстоятельствами, а также тем, что предположение об экспоненциальном распределении существенно упрощает расчеты надежности, объясняется широкое применение экспоненциального закона в инженерной практике.

Гамма-распределение случайной величины (рис. 3.3,б). Если отказ устройства возникает тогда, когда произойдет не менее  $k$  отказов его элементов, а отказы элементов подчинены экспоненциальному закону с параметрами  $\lambda_0$ , плотность вероятности отказа устройства

$$f(t) = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\lambda_0 t), \quad (3.9)$$

где  $\lambda_0$  - исходная интенсивность отказов элементов устройства, отказ которого вызывается отказом  $k$  элементов.

Этому распределению подчиняется время работы резервированных устройств. Равенство (3.9) получается из (3.3).

Вероятность  $k$  и более отказов, т.е. вероятность отказа данного устройства,

$$P(n \geq k) = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\lambda_0^n t^n}{n!} \exp(-\lambda_0 t). \quad (3.10)$$

Плотность вероятности отказа устройства за время  $t$

$$f(t) = \frac{d}{dt} \left[ 1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\lambda_0^n t^n}{n!} \exp(-\lambda_0 t) \right] = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\lambda_0 t). \quad (3.11)$$

Среднее время работы устройства до отказа

$$T_1 = kT_0 = k/\lambda_0. \quad (3.12)$$

Интенсивность отказов устройства

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0}{(k-1)!} \frac{\lambda_0^n t^{k-1}}{\sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{i!} \lambda_0^n t^i}. \quad (3.13)$$

Вероятность безотказного состояния устройства

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{i!} \lambda_0^n t^i. \quad (3.14)$$

При  $k = 1$   $\gamma$ -распределение совпадает с экспоненциальным распределением.

При увеличении  $k$   $\gamma$ -распределение будет приближаться к симметричному распределению, а интенсивность отказов будет иметь все более выраженный характер возрастающей функции времени.

Распределение Вейбулла. Для случая, когда поток отказов не стационарный, т.е. плотность потока изменяется с течением времени, функция распределения времени до отказа приобретает вид, показанный на рис. 3.3,в.

Плотность вероятности отказов этого распределения:

$$f(t) = \lambda \alpha t^{\alpha-1} \exp(-\lambda_0 t^\alpha). \quad (3.15)$$

Вероятность отсутствия отказа за время  $t$

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t^\alpha). \quad (3.16)$$

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1}. \quad (3.17)$$

В (3.15) - (3.17)  $\alpha$  и  $\lambda_0$  - параметры закона распределения. Параметр  $\lambda_0$  определяет масштаб, при его изменении кривая распределения сжимается или растягивается. При  $\alpha = 1$  функция распределения Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением; при  $\alpha < 1$  интенсивность отказов будет монотонно убывающей функцией; при  $\alpha > 1$  - монотонно возрастающей. Это обстоятельство дает возможность подбирать для опытных данных наиболее подходящие параметры  $\alpha$  и  $\lambda_0$ , с тем чтобы уравнение функции распределения наилучшим образом совпадало с опытными данными. Распределение Вейбулла имеет место для отказов, возникающих по причине усталости тела детали или поверхностных слоев (подшипники, зубчатые передачи). Этот случай связан с развитием усталостной трещины в зоне местной концентрации напряжений, технологического дефекта или начального повреждения. Период времени до зарождения микротрещины характеризуется признаками внезапного отказа, а процесс разрушения - признаками износного отказа.

Этот закон применим для отказов устройства, состоящего из последовательно соединенных дублированных элементов и других подобных случаев.

Это распределение иногда используется для описания надежности подшипников качения ( $\alpha = 1,4 - 1,7$ ).

Средняя наработка до первого отказа определится из следующего выражения:

$$T = \frac{\Gamma(1/\alpha + 1)}{\lambda_0^{1/\alpha}}. \quad (3.18)$$

Значения  $\Gamma$  (гамма-функции) табулированы (прилож. 2).

Нормальное распределение (рис. 3.3,г) случайной величины  $X$  возникает всякий раз, когда  $X$  зависит от большого числа однородных

по своему влиянию случайных факторов, причем влияние каждого из этих факторов по сравнению с совокупностью всех остальных незначительно. Это условие характерно для времени возникновения отказа, вызванного старением, т.е. этот закон используется для оценки надежности изделий при наличии постепенных (износных) отказов.

Плотность вероятности отказов

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(t-T)^2/2\sigma^2], \quad (3.19)$$

где  $T$  - средняя наработка до отказа;  $\sigma$  - среднее квадратическое (стандартное) отклонение времени безотказной работы.

Вероятность отказа время  $t$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp[-(t-T)^2/2\sigma^2]. \quad (3.20)$$

Значение функции распределения определяется формулой

$$F(t) = 0,5 + \Phi(u) = Q(t); u = (t-T) / \sigma. \quad (3.21)$$

Вероятность отсутствия отказа за время  $t$

$$P(t) = 1-Q(t) = 1-[0,5+\Phi(u)] = 0,5 - \Phi(u). \quad (3.22)$$

Значения  $F(t)$  табулированы (прилож. 3).

График  $\lambda(t)$  показан на рис. 3.3,г. Интенсивность отказов монотонно возрастает и после  $T$  начинает приближаться к асимптоте:

$$y = (t-T) / \sigma. \quad (3.23)$$

Монотонное возрастание интенсивности отказов с течением времени - характерный признак нормального распределения. Нормальное распределение существенно отличается от экспоненциального. Началом отсчета времени  $t$  в (3.20) служит начало эксплуатации объекта, т.е. момент, когда начинается процесс износа и старения, а началом отсчета в (3.4) - момент времени, когда установлено, что изделие исправно (этот момент может быть расположен в любой точке на оси времени).

Усеченное нормальное распределение (рис. 3.3, д). Так как при нормальном распределении случайная величина может принимать

любые значения от  $-\infty$  до  $+\infty$ , а время безотказной работы может быть только положительным, следует рассматривать усеченное нормальное распределение с плотностью вероятности отказов

$$f(t) = \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(t-T_1)^2/2\sigma^2]. \quad (3.24)$$

Нормирующий множитель  $c$  определяется из выражения

$$c \int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (3.25)$$

и равен

$$c = 1/F(T_1/\sigma) = 1/[0,5 + \Phi_0(T_1/\sigma)], \quad (3.26)$$

где  $F(T_1/\sigma) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{T_1/\sigma} \exp\left\{-x^2/2\right\} dx$  (3.27)

- табулированная (прилож. 4) интегральная функция нормального распределения;

$$\Phi_0(T_1/\sigma) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{T_1/\sigma} \exp\left\{-x^2/2\right\} dx \quad (3.28)$$

- нормированная функция Лапласа.

Тогда (3.24) запишется следующим образом:

$$f(t) = \frac{1}{F(T_1/\sigma)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(t-T_1)^2/2\sigma^2]. \quad (3.29)$$

Средняя наработка до отказа в усеченном распределении и параметр  $T_1$  неусеченного нормального распределения связаны зависимостью

$$T = T_1 + f(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi} F(T_1/\sigma)} \exp\left\{-T_1^2/2\sigma^2\right\}. \quad (3.30)$$

При  $T/\sigma \geq 2$ , что имеет место в абсолютном большинстве случаев при оценке надежности устройств с нормально распределенными отказами, коэффициент  $c$  мало отличается от единицы и усеченное нормальное распределение достаточно точно аппроксимируется обычным нормальным законом.

Вероятность безотказной работы определяется из выражения

$$P(t) = \frac{F\left[\frac{T_1 - t}{\sigma}\right]}{F\left[\frac{T_1}{\sigma}\right]}. \quad (3.31)$$

Интенсивность отказов находится из

$$\lambda(t) = \frac{\exp\left\{-\left[\frac{T_1 - t}{\sigma}\right]^2 / 2\sigma^2\right\}}{\sqrt{2\pi}\sigma F\left[\frac{T_1 - t}{\sigma}\right]}. \quad (3.32)$$

**Распределение Рэлея** (рис. 3.3,е) - непрерывное распределение вероятностей с плотностью

$$\begin{aligned} p(x) &= x/\sigma^2 \exp(-x^2/2\sigma^2) \text{ при } x > 0; \\ p(x) &= 0 \text{ при } x \leq 0, \end{aligned}$$

зависящей от масштабного параметра  $\sigma > 0$ . Распределение имеет положительную асимметрию, его единственная мода находится в точке  $x = \sigma$ . Все моменты распределения Рэлея конечны.

Также как и распределение Вейбулла или  $\gamma$ -распределение, распределение Рэлея пригодно для описания поведения изнашивающихся или стареющих изделий.

Частота отказов (функция плотности распределения вероятности отказов) определяется:

$$f(t) = t/\sigma^2 \exp(-t^2/2\sigma^2). \quad (3.33)$$

Вероятность безотказной работы вычисляется из выражения

$$P(t) = \exp(-t^2/2\sigma^2). \quad (3.34)$$

Интенсивность отказов находится из

$$\lambda(t) = t/\sigma^2. \quad (3.35)$$

Средняя наработка до первого отказа составит

$$T = \sqrt{\pi/2} \cdot \sigma. \quad (3.36)$$

### **3.4. О ВЫБОРЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ПРИ РАСЧЕТЕ НАДЕЖНОСТИ**

Определение закона распределения отказов имеет большое значение при исследованиях и оценках надежности. Определение  $P(t)$  по одной и той же исходной информации о  $T$ , но при различных предположениях о законе распределения может привести к существенно отличающимся результатам.

Закон распределения отказов можно определить по экспериментальным данным, но для этого необходимо проведение большого числа опытов в идентичных условиях. Практически эти условия, как правило, трудно обеспечить. Кроме того, такое решение содержит черты пассивной регистрации событий.

Вместе с тем во многих случаях за время эксплуатации успевают отказать лишь незначительная доля первоначально имевшихся объектов. Полученным статистическим данным соответствует начальная (левая) часть экспериментального распределения.

Более рационально - изучение условий, физических процессов при которых возникает то или другое распределение. При этом составляются модели возникновения отказов и соответствующие им законы распределения времени до появления отказа, что позволяет делать обоснованные предположения о законе распределения.

Опытные данные должны служить средством проверки обоснованности прогноза, а не единственным источником данных о законе распределения. Такой подход необходим для оценки надежности новых изделий, для которых статистический материал весьма ограничен.

## 4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

**Резервирование** - метод повышения надежности объекта введением дополнительных элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых для нормального выполнения объектом заданных функций. В этом случае отказ наступает только после отказа основного элемента и всех резервных элементов.

Систему можно представить из ряда ступеней, выполняющих отдельные функции. Задача резервирования состоит в нахождении такого числа резервных образцов оборудования на каждой ступени, которое будет обеспечивать заданный уровень надежности системы при наименьшей стоимости.

Выбор наилучшего варианта зависит главным образом от того увеличения надежности, которое можно достичь при заданных расходах.

Основной элемент - элемент основной физической структуры объекта, минимально необходимой для нормального выполнения объектом его задач.

Резервный элемент - элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

### 4.1. ВИДЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

**Структурное (элементное) резервирование** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта. Обеспечивается подключением к основной аппаратуре резервной таким образом, чтобы при отказе основной аппаратуры резервная продолжала выполнять ее функции.

**Резервирование функциональное** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных и наряду с ними.

**Временное резервирование** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточного времени, выделенного для выполнения задач. Другими словами, временное резервирование - такое планирование работы системы, при котором создается резерв рабочего времени для выполнения заданных



функций. Резервное время может быть использовано для повторения операции, либо для устранения неисправности объекта.

**Информационное резервирование** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения задач.

**Нагрузочное резервирование** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности его элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных.

С позиций расчета и обеспечения надежности технических систем необходимо рассматривать структурное резервирование.

## 4.2. СПОСОБЫ СТРУКТУРНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

По способу подключения резервных элементов и устройств различают следующие способы резервирования (рис. 4.1).

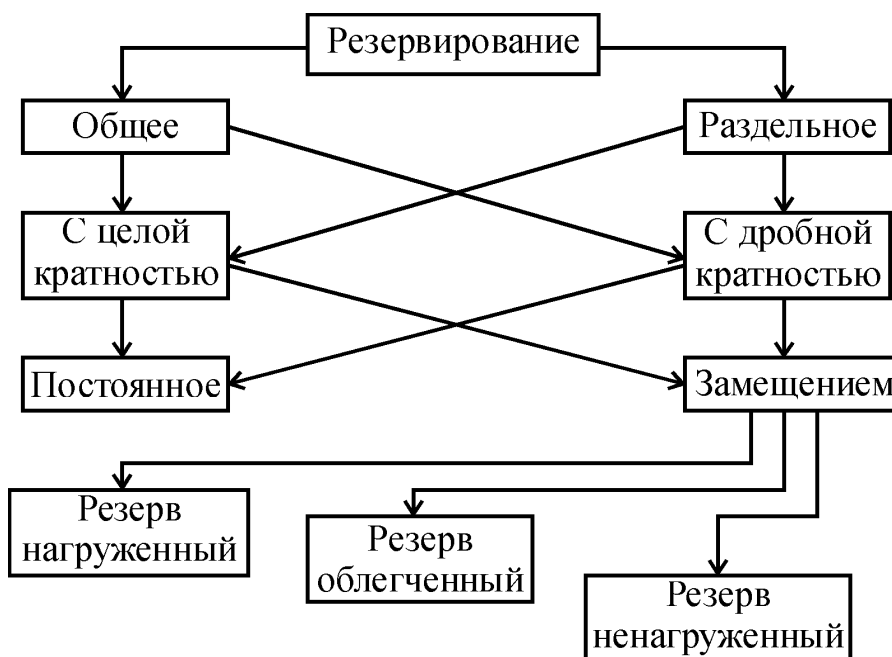


Рис. 4.1. Способы структурного резервирования

**Резервирование раздельное (поэлементное) с постоянным включением резервных элементов** (рис. 4.2).

Такое резервирование возможно тогда, когда подключение резервного элемента не существенно изменяет рабочий режим устройства. Достоинство его - постоянная готовность резервного элемента, отсутствие затраты времени на переключение. Недостаток -

резервный элемент расходует свой ресурс так же, как основной элемент.

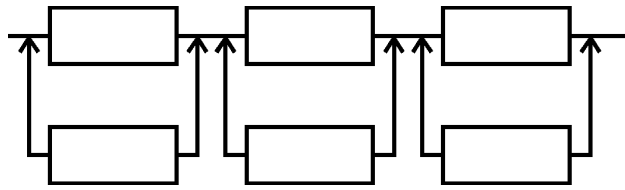


Рис. 4.2. Резервирование раздельное с постоянным включением резервных элементов

*Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента одним резервным элементом* (рис. 4.3). Это такой способ резервирования, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

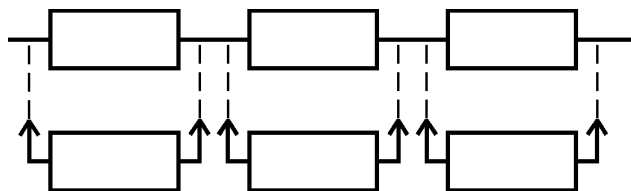


Рис. 4.3. Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента

В этом случае резервный элемент находится в разной степени готовности к замене основного элемента. Достоинство этого способа - резервный элемент сохраняет свой рабочий ресурс, либо может быть использован для выполнения самостоятельной задачи. Рабочий режим основного устройства не искажается. Недостаток - необходимость затрачивать время на подключение резервного элемента. Резервных элементов может быть меньше, чем основных.

Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых называется *кратностью резервирования* -  $m$ . При резервировании с целой кратностью величина  $m$  есть *целое число*, при резервировании с дробной кратностью величина  $m$  есть *дробное несокращаемое число*. Например,  $m=4/2$  означает наличие резервирования с дробной кратностью, при котором число резервных элементов равно четырем, число основных - двум, а общее число элементов равно шести. Сокращать дробь нельзя, так как если  $m=4/2=2/1$ , то это означает, что имеет место резервирование с целой кратностью, при котором число

резервных элементов равно двум, а общее число элементов равно трем.

При включении резерва по способу замещения резервные элементы до момента включения в работу могут находиться в трех состояниях:

- нагруженном резерве;
- облегченном резерве;
- ненагруженном резерве.

**Нагруженный резерв** - резервный элемент, находящийся в том же режиме, что и основной.

**Облегченный резерв** - резервный элемент, находящийся в менее нагруженном режиме, чем основной.

**Ненагруженный резерв** - резервный элемент, практически не несущий нагрузку.

**Резервирование общее с постоянным подключением, либо с замещением** (рис. 4.4). В этом случае резервируется объект в целом, а в качестве резервного - используется аналогичное сложное устройство. Этот способ менее экономичен, чем раздельное резервирование. При отказе, например, первого основного элемента возникает необходимость подключать всю технологическую резервную цепочку.

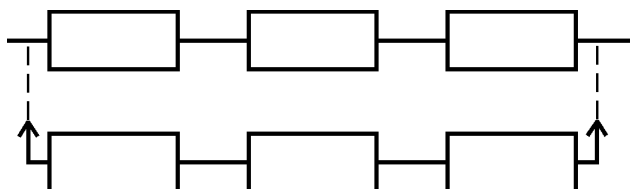


Рис. 4.4. Резервирование общее

**Резервирование мажоритарное ("голосование"  $n$  из  $m$  элементов)** (рис. 4.5). Этот способ основан на применении дополнительного элемента - его называют **мажоритарный** или **логический** или **кворум-элемент**. Он позволяет вести сравнение сигналов, поступающих от элементов, выполняющих одну и ту же функцию. Если результаты совпадают, тогда они передаются на выход устройства. На рис. 4.5 изображено резервирование по принципу голосования "**два из трех**", т.е. любые два совпадающих результата из трех считаются истинными и проходят на выход устройства. Можно применять соотношения три из пяти и др. Главное достоинство этого способа - обеспечение повышения надежности при любых видах отказов работающих элементов. Любой

вид одиночного отказа элемента не окажет влияния на выходной результат.

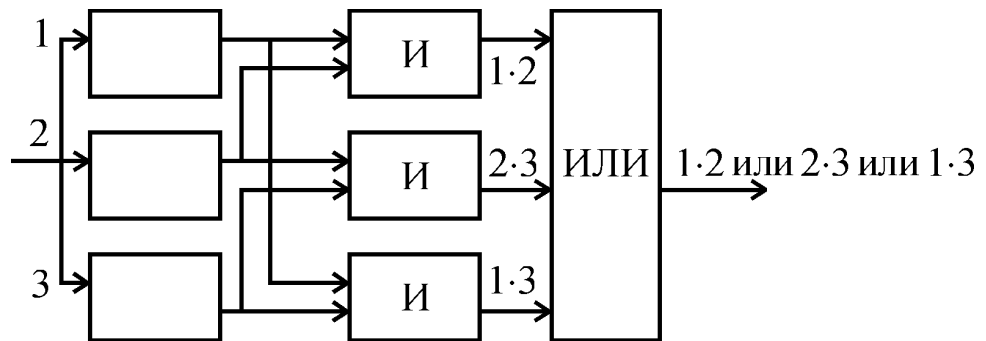


Рис. 4.5. Резервирование мажоритарное

## 5. ОСНОВЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПО НАДЕЖНОСТИ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

### 5.1. ЦЕЛЕВОЕ НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

*Расчеты надежности* - расчеты, предназначенные для определения количественных показателей надежности. Они проводятся на различных этапах разработки, создания и эксплуатации объектов.

На этапе *проектирования* расчет надежности производится с целью прогнозирования (предсказания) ожидаемой надежности проектируемой системы. Такое прогнозирование необходимо для обоснования предполагаемого проекта, а также для решения организационно-технических вопросов:

- выбора оптимального варианта структуры;
- способа резервирования;
- глубины и методов контроля;
- количества запасных элементов;
- периодичности профилактики.

На этапе *испытаний и эксплуатации* расчеты надежности проводятся для оценки количественных показателей надежности. Такие расчеты носят, как правило, характер констатации. Результаты расчетов в этом случае показывают, какой надежностью обладали объекты, прошедшие испытания или используемые в некоторых условиях эксплуатации. На основании этих расчетов разрабатываются меры по повышению надежности, определяются слабые места объекта, даются оценки его надежности и влияния на нее отдельных факторов.

Многочисленные цели расчетов привели к большому их разнообразию. На рис. 5.1 изображены основные виды расчетов.

*Элементный расчет* - определение показателей надежности объекта, обусловленных надежностью его комплектующих частей (элементов). В результате такого расчета оценивается техническое состояние объекта (вероятность того, что объект будет находиться в работоспособном состоянии, средняя наработка на отказ и т.п.).

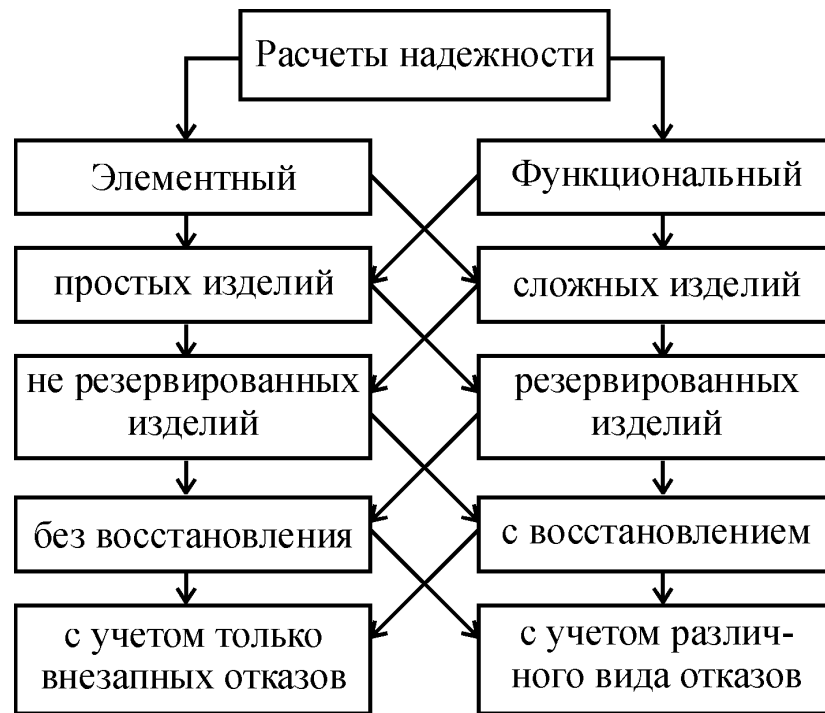


Рис. 5.1. Классификация расчетов надежности

**Расчет функциональной надежности** - определение показателей надежности выполнения заданных функций (например, вероятность того, что система очистки газа будет работать заданное время, в заданных режимах эксплуатации с сохранением всех необходимых параметров по показателям очистки). Поскольку такие показатели зависят от ряда действующих факторов, то, как правило, расчет функциональной надежности более сложен, чем элементный расчет.

Выбирая на рис 5.1 варианты перемещений по пути, указанному стрелками, каждый раз получаем новый вид (случай) расчета.

Самый простой расчет - расчет, характеристики которого представлены на рис. 5.1 слева: элементный расчет аппаратурной надежности простых изделий, нерезервированных, без учета восстановлений работоспособности при условии, что время работы до отказа подчинено экспоненциальному распределению.

Самый сложный расчет - расчет, характеристики которого представлены на рис. 5.1 справа: функциональной надежности сложных резервированных систем с учетом восстановления их работоспособности и различных законов распределения времени работы и времени восстановления.

Выбор того или иного вида расчета надежности определяется заданием на расчет надежности. На основании задания и последующего изучения работы устройства (по его техническому

описанию) составляется алгоритм расчета надежности, т.е. последовательность этапов расчета и расчетные формулы.

## 5.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА СИСТЕМ

Последовательность расчета системы представлена на рис. 5.2. Рассмотрим основные ее этапы.

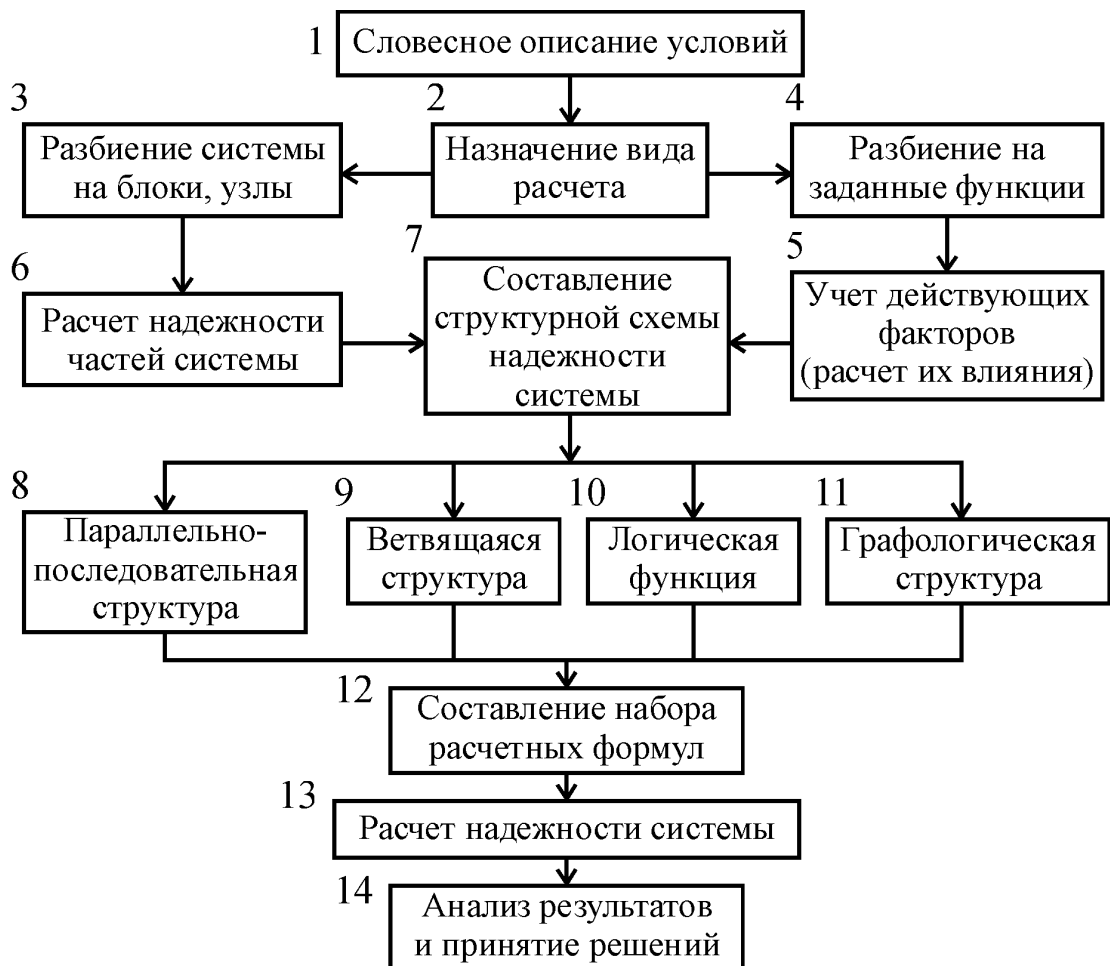


Рис. 5.2. Алгоритм расчета надежности

Прежде всего четко следует сформулировать задание на расчет надежности. В нем должны быть указаны: 1) назначение системы ее состав и основные сведения о функционировании; 2) показатели надежности и признаки отказов, целевое назначение расчетов; 3) условия, в которых работает (или будет работать) система; 4) требования к точности и достоверности расчетов, к полноте учета действующих факторов.

На основании изучения задания делается вывод о характере предстоящих расчетов. В случае расчета функциональной

надежности осуществляется переход к этапам **4-5-7**, в случае расчета элементов (аппаратурной надежности) - к этапам **3-6-7**.

Под **структурной схемой надежности** понимается наглядное представление (графическое или в виде логических выражений) условий, при которых работает или не работает исследуемый объект (система, устройство, технический комплекс и т.д.). Типовые структурные схемы представлены на рис. 5.3.

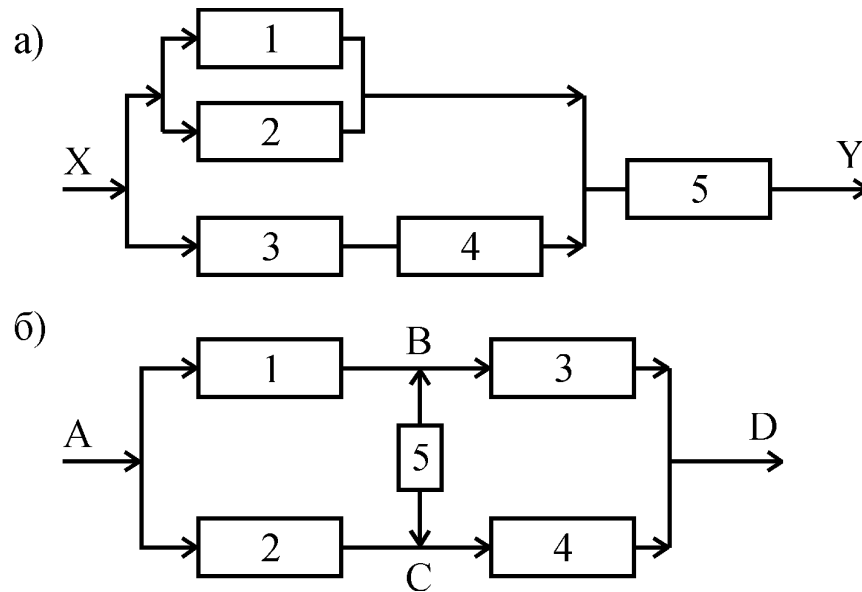


Рис. 5.3. Типовые структуры расчета надежности

Простейшей формой структурной схемы надежности является параллельно-последовательная структура. На ней параллельно соединяются элементы, совместный отказ которых приводит к отказу

В последовательную цепочку соединяются такие элементы, отказ любого из которых приводит к отказу объекта.

На рис. 5.3,а представлен вариант параллельно-последовательной структуры. По этой структуре можно сделать следующее заключение. Объект состоит из пяти частей. Отказ объекта наступает тогда, когда откажет или элемент 5, или узел, состоящий из элементов 1-4. Узел может отказаться тогда, когда одновременно откажет цепочка, состоящая из элементов 3,4 и узел, состоящий из элементов 1,2. Цепь 3-4 отказывает, если откажет хотя бы один из составляющих ее элементов, а узел 1,2 - если откажут оба элемента, т.е. элементы 1,2. Расчет надежности при наличии таких структур отличается наибольшей простотой и наглядностью. Однако не всегда удается условие работоспособности представить в виде



простой параллельно-последовательной структуры. В таких случаях используют или логические функции, или графы и ветвящиеся структуры, по которым оставляются системы уравнений работоспособности.

На основе структурной схемы надежности составляется набор расчетных формул. Для типовых случаев расчета используются формулы, приведенные в справочниках по расчетам надежности, стандартах и методических указаниях. Прежде чем применять эти формулы, необходимо предварительно внимательно изучить их существо и области использования.

### ***5.3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАРАЛЛЕЛЬНО- ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР***

Пусть некоторая техническая система  $D$  составлена из  $n$  элементов (узлов). Допустим, надежности элементов нам известны. Возникает вопрос об определении надежности системы. Она зависит от того, каким образом элементы объединены в систему, какова функция каждого из них и в какой мере исправная работа каждого элемента необходима для работы системы в целом.

Параллельно-последовательная структура надежности сложного изделия дает представление о связи между надежностью изделия и надежностью его элементов. Расчет надежности ведется последовательно - начиная от расчета элементарных узлов структуры к ее все более сложным узлам. Например, в структуре рис. 5.3,а узел, состоящий из элементов 1-2 - элементарный узел, состоящий из элементов 1-2-3-4, сложный. Эта структура может быть сведена к эквивалентной, состоящей из элементов 1-2-3-4 и элемента 5, соединенных последовательно. Расчет надежности в данном случае сводится к расчету отдельных участков схемы, состоящих из параллельно и последовательно соединенных элементов.

#### ***5.3.1. Система с последовательным соединением элементов***

Самым простым случаем в расчетном смысле является последовательное соединение элементов системы. В такой системе отказ любого элемента равносителен отказу системы в целом. По аналогии с цепочкой последовательно соединенных проводников,

обрыв каждого из которых равносильен размыканию всей цепи, мы и называем такое соединение "последовательным" (рис. 5.4). Следует оговориться, что "последовательным" такое соединение элементов является только в смысле надежности, физически они могут быть соединены как угодно.



Рис. 5.4. Блок-схема системы с последовательным соединением элементов

С позиции надежности, такое соединение означает, что отказ устройства, состоящего из этих элементов, происходит при отказе элемента 1 или элемента 2, или элемента 3, или элемента n. Условие работоспособности можно сформулировать следующим образом: устройство работоспособно, если работоспособен элемент 1 и элемент 2, и элемент 3, и элемент n.

Выразим надежность данной системы через надежности ее элементов. Пусть имеется некоторый промежуток времени  $(0, \tau)$ , в течение которого требуется обеспечить безотказную работу системы. Тогда, если надежность системы характеризуется законом надежности  $P(t)$ , нам важно знать значение этой надежности при  $t = \tau$ , т.е.  $P(\tau)$ . Это не функция, а определенное число; отбросим аргумент  $t$  и обозначим надежность системы просто  $P$ . Аналогично обозначим надежности отдельных элементов  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ .

Для безотказной работы простой системы в течение времени  $\tau$  нужно, чтобы безотказно работал каждый из ее элементов. Обозначим  $S$  - событие, состоящее в безотказной работе системы за время  $\tau$ ;  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$  - события, состоящие в безотказной работе соответствующих элементов. Событие  $S$  есть произведение (совмещение) событий  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ :

$$S = s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot \dots \cdot s_n.$$

Предположим, что элементы  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$  отказывают **независимо друг от друга** (или, как говорят применительно к надежности, "независимы по отказам", а совсем кратко "независимы"). Тогда по правилу умножения вероятностей для независимых событий  $P(S) = P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot P(s_3) \cdot \dots \cdot P(s_n)$  или в других обозначениях,

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n, \quad (5.1)$$

а короче 
$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (5.2)$$

т.е. надежность (вероятность работоспособного состояния) простой системы, составленной из независимых по отказам, последовательно соединенных элементов, равна произведению надежностей ее элементов.

В частном случае, когда все элементы обладают одинаковой надежностью  $P_1=P_2=P_3= \dots =P_n$ , выражение (5.2) принимает вид

$$P = P^n. \quad (5.3)$$

Пример 5.1. Система состоит из 10 независимых элементов, надежность каждого из которых равна  $P=0,95$ . Определить надежность системы.

По формуле (5.3)  $P = 0,95^{10} \approx 0,6$ .

Из примера видно, как резко падает надежность системы при увеличении в ней числа элементов. Если число элементов  $n$  велико, то для обеспечения хотя бы приемлемой надежности  $P$  системы каждый элемент должен обладать очень высокой надежностью.

Поставим вопрос: какой надежностью  $P$  должен обладать отдельный элемент для того, чтобы система, составленная из  $n$  таких элементов, обладала заданной надежностью  $P$ ?

Из формулы (5.3) получим:

$$P = \sqrt[n]{P} .$$

Пример 5.2. Простая система состоит из 1000 одинаково надежных, независимых элементов. Какой надежностью должен обладать каждый из них для того, чтобы надежность системы была не меньше 0,9?

По формуле (5.4)  $P = \sqrt[1000]{0,9}$ ;  $\lg P = \lg 0,9^{1/1000}$ ;  $P \approx 0,9999$ .

Интенсивность отказов системы при экспоненциальном законе распределения времени до отказа легко определить из выражения

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n, \quad (5.4)$$

т.е. как сумму интенсивностей отказов независимых элементов. Это и естественно, так как для системы, в которой элементы соединены последовательно, отказ элемента равносильен отказу системы, значит все потоки отказов отдельных элементов складываются в один поток отказов системы с интенсивностью, равной сумме интенсивностей отдельных потоков.

Формула (5.4) получается из выражения

$$P = P_1 P_2 P_3 \dots P_n = \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)\}. \quad (5.5)$$

Среднее время работы до отказа

$$T_0 = 1/\lambda_c. \quad (5.6)$$

Пример 5.3. Простая система S состоит из трех независимых элементов, плотности распределения времени безотказной работы которых заданы формулами:

$$\left. \begin{aligned} f_1(t) &= 1, \\ f_2(t) &= 2t, \\ f_3(t) &= 2(1-t) \end{aligned} \right\} \text{при } 0 < t < 1 \text{ (рис. 5.5).}$$

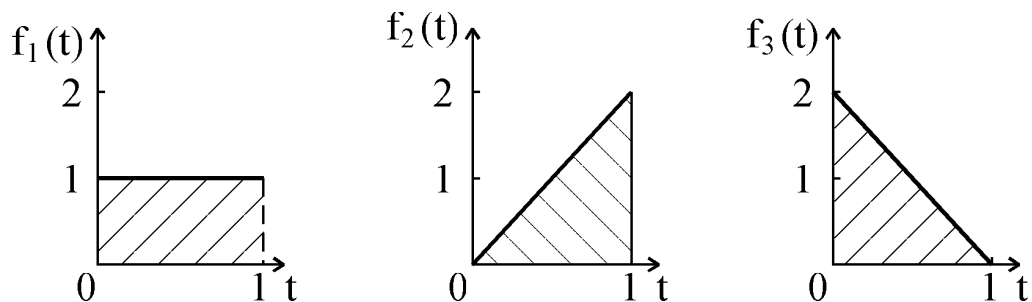


Рис. 5.5. Плотности распределения времени безотказной работы

Найти интенсивность отказов системы.

Решение. Определяем ненадежность каждого элемента:

$$\left. \begin{aligned} q_1(t) &= 1, \\ q_2(t) &= t^2, \\ q_3(t) &= 2t - t^2 \end{aligned} \right\} \text{при } 0 < t < 1.$$

Отсюда надежности элементов:

$$\left. \begin{aligned} p_1(t) &= 1 - t, \\ p_2(t) &= 1 - t^2, \\ p_3(t) &= 1 - 2t + t^2 \end{aligned} \right\} \text{при } 0 < t < 1.$$

Интенсивности отказов элементов (условная плотность вероятности отказов) - отношение  $f(t)$  к  $p(t)$ :

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1(t) &= 1/(1 - t), \\ \lambda_2(t) &= 2t/(1 - t^2), \\ \lambda_3(t) &= 2(1 - t)/(1 - 2t + t^2) \end{aligned} \right\} \text{при } 0 < t < 1.$$

Складывая, имеем:  $\lambda_c = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \lambda_3(t)$ .

Пример 5.4. Предположим, что для работы системы с последовательным соединением элементов при полной нагрузке необходимы два разнотипных насоса, причем насосы имеют постоянные интенсивности отказов, равные соответственно  $\lambda_1=0,0001\text{ч}^{-1}$  и  $\lambda_2=0,0002\text{ч}^{-1}$ . Требуется вычислить среднее время безотказной работы данной системы и вероятность ее безотказной работы в течение 100ч. Предполагается, что оба насоса начинают работать в момент времени  $t=0$ .

С помощью формулы (5.5) находим вероятность безотказной работы  $P_s$  заданной системы в течение 100ч:

$$P_s(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}.$$

$$P_s(100) = e^{-(0,0001 + 0,0002) \cdot 100} = 0,97045.$$

Используя формулу (5.6), получаем

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{1}{0,0001 + 0,0002} = 3333,3 \text{ ч.}$$

### 5.3.2. Система с параллельным соединением элементов

На рис. 5.6 представлено параллельное соединение элементов 1, 2, 3. Это означает, что устройство, состоящее из этих элементов, переходит в отказовое состояние после отказа всех элементов при условии, что все элементы системы находятся под нагрузкой, а отказы элементов статистически независимы.

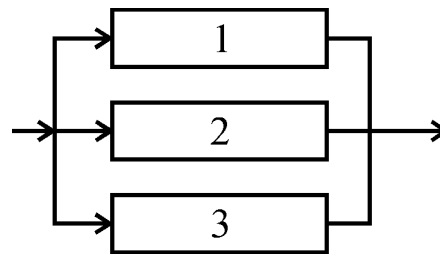


Рис. 5.6. Блок-схема системы с параллельным соединением элементов

Условие работоспособности устройства можно сформулировать следующим образом: устройство работоспособно, если работоспособен элемент 1 или элемент 2, или элемент 3, или элементы 1 и 2, 1; и 3, 2; и 3, 1; и 2; и 3.

Вероятность безотказного состояния устройства, состоящего из  $n$  параллельно соединенных элементов определяется по теореме сложения вероятностей совместных случайных событий как

$$P = (p_1 + p_2 + \dots + p_n) - (p_1 p_2 + p_1 p_3 + \dots) - (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_n + \dots) - \dots \pm (p_1 p_2 p_3 \dots p_n). \quad (5.7)$$

Для приведенной блок-схемы (рис. 5.6), состоящей из трех элементов, выражение (5.7) можно записать:

$$P = p_1 + p_2 + p_3 - (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) + p_1 p_2 p_3.$$

Применительно к проблемам надежности, по правилу умножения вероятностей независимых (в совокупности) событий, надежность устройства из  $n$  элементов вычисляется по формуле

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (5.8)$$

т.е. при параллельном соединении независимых (в смысле надежности) элементов их ненадежности ( $1 - p_i = q_i$ ) перемножаются.

В частном случае, когда надежности всех элементов одинаковы, формула (5.8) принимает вид

$$P = 1 - (1 - p)^n. \quad (5.9)$$

Пример 5.5. Предохранительное устройство, обеспечивающее безопасность работы системы под давлением, состоит из трех дублирующих друг друга клапанов. Надежность каждого из них

$p=0,9$ . Клапаны независимы в смысле надежности. Найти надежность устройства.

Решение. По формуле (5.9)  $P=1-(1-0,9)^3=0,999$ .

Интенсивность отказов устройства состоящего из  $n$  параллельно соединенных элементов, обладающих постоянной интенсивностью отказов  $\lambda_0$ , определяется как

$$\lambda = \frac{dQ(t)dt}{P(t)} = \frac{d[1 - \exp(-\lambda_0 t)^n]/dt}{1 - \exp(-\lambda_0 t)^n} = \frac{n\lambda_0 \exp(-\lambda_0 t)^{n-1}}{1 - \exp(-\lambda_0 t)^n}. \quad (5.10)$$

Из (5.10) видно, что интенсивность отказов устройства при  $n>1$  зависит от  $t$ : при  $t=0$  она равна нулю, при увеличении  $t$ , монотонно возрастает до  $\lambda_0$ .

Если интенсивности отказов элементов постоянны и подчинены показательному закону распределения, то выражение (5.8) можно записать

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - \exp(-\lambda_i t)]. \quad (5.11)$$

Среднее время безотказной работы системы  $T_0$  находим, интегрируя уравнение (5.11) в интервале  $[0, \infty]$ :

$$\begin{aligned} T_0 &= \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n [1 - \exp(-\lambda_i t)] \right\} dt = \\ &= (1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 + \dots + 1/\lambda_n) - (1/(\lambda_1 + \lambda_2) + 1/(\lambda_1 + \lambda_3) + \dots) + \\ &+ (1/(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) + 1/(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4) + \dots) + (-1)^{n+1} \times 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i. \end{aligned} \quad (5.12)$$

В случае, когда интенсивности отказов всех элементов одинаковы, выражение (5.12) принимает вид

$$T_0 = 1/\lambda \sum_{i=1}^n 1/i. \quad (5.13)$$

Среднее время работы до отказа также можно получить, интегрируя уравнение (5.7) в интервале  $[0, \infty]$

Пример 5.6. Предположим, что два одинаковых вентилятора в системе очистки отходящих газов работают параллельно, причем если один из них выходит из строя, то другой способен работать при полной системной нагрузке без изменения своих надежностных характеристик.

Требуется найти безотказность системы в течение 400ч (продолжительность выполнения задания) при условии, что интенсивности отказов двигателей вентиляторов постоянны и равны  $\lambda=0,0005\text{ч}^{-1}$ , отказы двигателей статистически независимы и оба вентилятора начинают работать в момент времени  $t=0$ .

Решение. В случае идентичных элементов формула (5.11) принимает вид

$$P(t) = 2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t).$$

Поскольку  $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$  и  $t = 400 \text{ ч}$ , то

$$P_{(400)} = 2\exp(-0,0005 \times 400) - \exp(-2 \times 0,0005 \times 400) = 0,9671.$$

Среднюю наработку на отказ находим, используя (5.13):

$$T_0 = 1/\lambda(1/1 + 1/2) = 1/\lambda \times 3/2 = 1,5/0,0005 = 3000 \text{ ч}.$$

### 5.3.3. Способы преобразования сложных структур

Относительная простота расчетов надежности, основанных на использовании параллельно-последовательных структур, делают их самыми распространенными в инженерной практике. Однако не всегда условие работоспособности можно непосредственно представить параллельно-последовательной структурой. В этом случае можно сложную структуру заменить ее эквивалентной параллельно-последовательной структурой. К таким преобразованиям относятся:

- преобразование с эквивалентной заменой треугольника на звезду и обратно;

- разложение сложной структуры по базовому элементу.

Существо способа *преобразования с помощью эквивалентной замены треугольника на звезду и обратно* заключается в том, что узел сложной конфигурации заменяется на узел другой, более простой конфигурации, но при этом подбираются такие характеристики нового узла, что надежности преобразуемой цепи сохранялись прежними.



Пусть, например, требуется заменить треугольник (рис. 5.7,а) звездой (рис. 5.7,б) при условии, что вероятность отказа элемента  $a$  равна  $q_{13}$ , элемента  $b$  равна  $q_{12}$ , элемента  $c$  -  $q_{23}$ . Переход к соединению звездой не должен изменить надежность цепей 1-2, 1-3, 2-3. Поэтому значение вероятностей отказов элементов звезды  $q_1, q_2, q_3$  должны удовлетворять следующим равенствам:

$$\left. \begin{aligned} q_1 + q_2 - q_1q_2 &= q_{12}(q_{23} + q_{31} - q_{23}q_{31}); \\ q_2 + q_3 - q_2q_3 &= q_{23}(q_{31} + q_{12} - q_{31}q_{12}); \\ q_3 + q_1 - q_3q_1 &= q_{31}(q_{12} + q_{23} - q_{12}q_{23}). \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

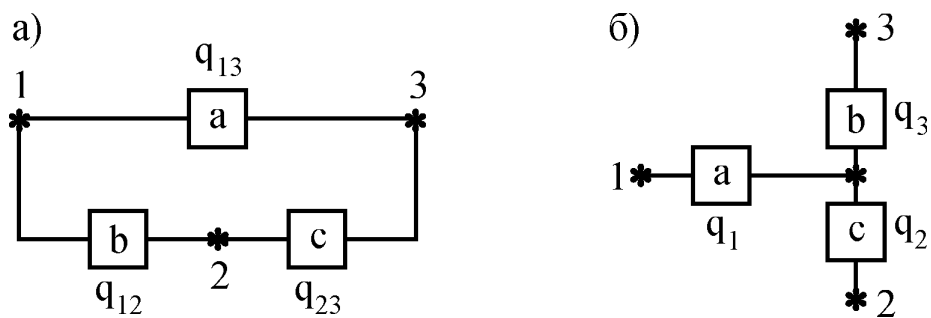


Рис. 5.7. Преобразование "треугольник - звезда"

Если пренебречь произведениями вида  $q_iq_j$ ;  $q_iq_jq_k$ , то в результате решения системы уравнения (5.14) можно записать:

$$q_1 = q_{12}q_{31}; \quad q_2 = q_{23}q_{12}; \quad q_3 = q_{31}q_{23}. \quad (5.15)$$

Для обратного преобразования звезды в треугольник

$$q_{12} = \sqrt{q_1q_2/q_3}; \quad q_{23} = \sqrt{q_2q_3/q_1}; \quad q_{31} = \sqrt{q_1q_3/q_2}. \quad (5.16)$$

**Пример 5.7.** Определить вероятность безотказной работы устройства, структурная схема которого изображена на рис. 5.3,б, если известно, что вероятности безотказной работы каждого из элементов схемы равны 0,9, а вероятности отказов равны 0,1.

**Решение.**

1. Преобразуем соединение элементов 1,2,5 в треугольник (рис. 5.8,а), в звезду (рис. 5.8, б).

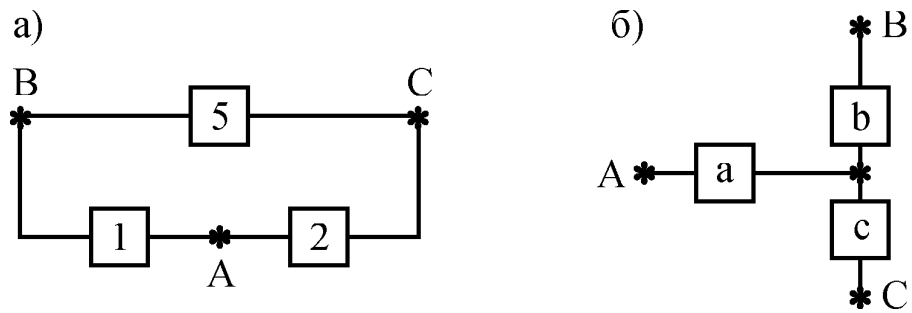


Рис. 5.8. К примеру преобразования структуры

2. Определим эквивалентные значения вероятности отказов для новых элементов  $a, b, c$

$$q_a = q_1 q_2 = 0,1 \times 0,1 = 0,01;$$

$$q_b = q_1 q_5 = 0,1 \times 0,1 = 0,01;$$

$$q_c = q_2 q_5 = 0,1 \times 0,1 = 0,01.$$

3. Определим значения вероятности безотказного состояния элементов эквивалентной схемы (рис. 5.8,б)

$$p_a = p_b = p_c = 0,99.$$

4. Определим вероятность безотказной работы эквивалентного устройства (рис. 5.9):

$$P = p_a(p_b p_3 + p_c p_4 - p_b p_3 p_c p_4) =$$

$$= 0,99(0,99 \times 0,9 + 0,99 \times 0,9 - 0,99 \times 0,9 \times 0,99 \times 0,9) = 0,978.$$

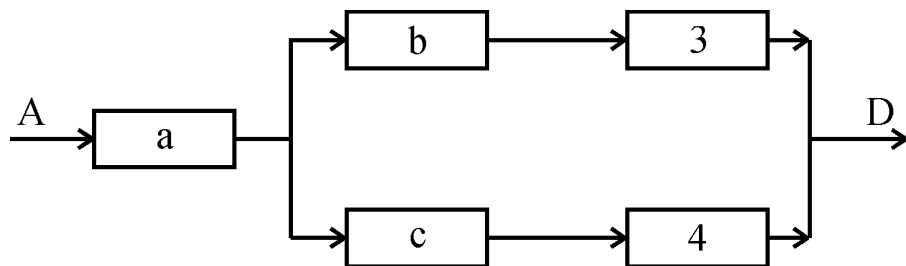


Рис. 5.9. Преобразованная структура

Способ **преобразования с помощью разложения сложной структуры по некоторому базовому элементу** основан на использовании теоремы о сумме вероятностей несовместных событий. В сложной структуре выбирают базовый элемент (или группу базовых элементов) и делаются следующие допущения:

- базовый элемент находится в работоспособном состоянии;

- базовый элемент находится в отказовом состоянии.

Для этих случаев, представляющих собой два несовместных события, исходная структура преобразовывается в две новые схемы. В первой из них вместо базового элемента ставится "короткое замыкание" цепи, а во второй - разрыв. Вероятности безотказной работы каждой из полученных простых структур вычисляются и умножаются: первая - на вероятность безотказного состояния базового элемента, вторая - на вероятность отказа базового элемента. Полученные произведения складываются. Сумма равна искомой вероятности безотказной работы сложной структуры.

Пример 5.8. Решить предыдущий пример методом разложения сложной структуры.

Решение.

1. В качестве базового элемента примем элемент 5 (рис. 5.3,б).

2. Закоротим базовый элемент, т.е. сделаем допущение об абсолютной его проводимости. Присоединим к полученной структуре последовательно базовый элемент с характеристикой его надежности  $p_5$ . В результате вместо исходной структуры получим новую структуру (рис. 5.10,а).

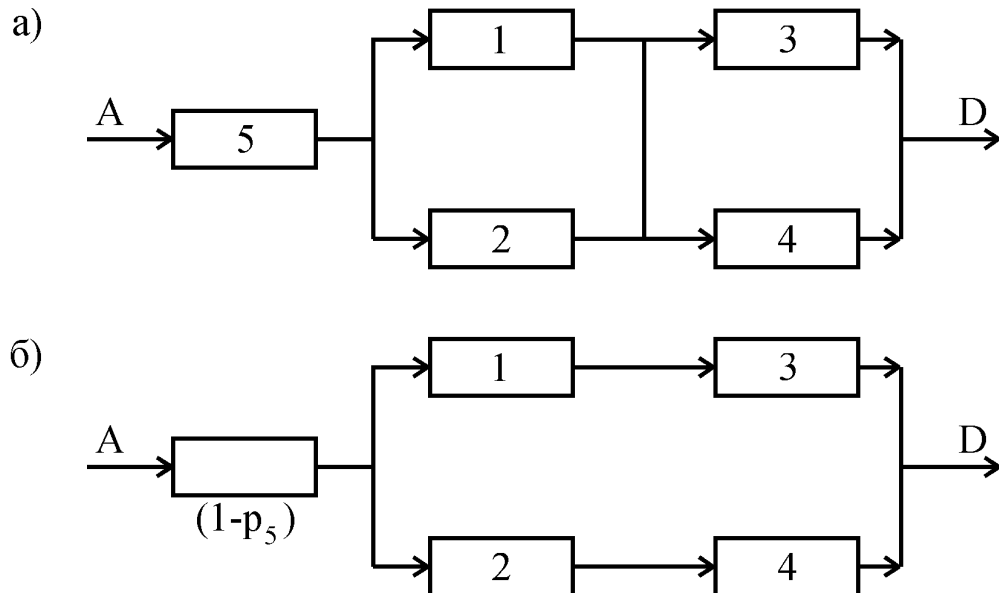


Рис. 5.10. Пример разложения мостиковой структуры по базовому элементу

3. Произведем обрыв базового элемента, т.е. сделаем предположение об его абсолютной ненадежности (непроводимости). К полученной структуре присоединим последовательно базовый

элемент с характеристикой его ненадежности  $(1-p_5)$ . В результате получим структуру (рис. 5.10,б).

4. Искомая вероятность равна сумме вероятностей структур (рис. 5.10,а,б), каждая из которых параллельно-последовательная. Поэтому

$$P = p_5[(p_1+p_2-p_1p_2)(p_3+p_4-p_3p_4)] + (1-p_5)[p_1p_3+p_2p_4-p_1p_3p_2p_4]=$$

$$= 0,9[(0,9+0,9 - 0,9 \times 0,9) \times (0,9+0,9 - 0,9 \times 0,9)] +$$

$$+ (1-0,9) \times [0,9 \times 0,9 + 0,9 \times 0,9 - 0,9 \times 0,9 \times 0,9] \approx 0,978.$$

Вероятность безотказной работы мостиковой схемы, состоящей из пяти неодинаковых и независимых элементов, можно определить по формуле [3]:

$$P = 2p_1p_2p_3p_4p_5 - p_2p_3p_4p_5 - p_1p_3p_4p_5 - p_1p_2p_4p_5 - p_1p_2p_3p_5 -$$

$$- p_1p_2p_3p_4 + p_1p_3p_5 + p_2p_3p_4 + p_1p_4 + p_2p_5. \tag{5.17}$$

В случае идентичных элементов эта формула принимает вид

$$P = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2. \tag{5.18}$$

Подставляя соотношение (5.18) в формулу (5.4), получаем, что в случае использования элементов с постоянной интенсивностью отказов (экспоненциальном законе распределения отказов)

$$P(t) = 2\exp(-5\lambda t) - 5\exp(-4\lambda t) + 2\exp(-3\lambda t) + 2\exp(-2\lambda t). \tag{5.19}$$

Среднее время безотказной работы системы  $T_0$  находим, путем интегрирования уравнения (5.19) в интервале  $[0, \infty]$ :

$$T_0 = \int_0^{\infty} 2\exp(-5\lambda t) - 5\exp(-4\lambda t) + 2\exp(-3\lambda t) + 2\exp(-2\lambda t) dt =$$

$$= (49/60) \times (1/\lambda). \tag{5.20}$$

**Пример 5.9.** Определить вероятность безотказной работы устройства, структурная схема которого изображена на рис. 5.3,б, если известно, что вероятности безотказной работы каждого из элементов схемы равны 0,9.

**Решение.**

Так как все элементы идентичны, воспользуемся формулой (5.18); с ее помощью получаем:

$$P = 2 \times 0,9^5 - 5 \times 0,9^4 + 2 \times 0,9^3 + 2 \times 0,9^2 \approx 0,978.$$

Пример 5.10. Требуется определить вероятность безотказной работы и среднюю наработку на отказ системы, состоящей из пяти независимых и одинаковых элементов, соединенных по мостиковой схеме (рис. 5.3,б); считается, что  $\lambda=0,0005\text{ч}^{-1}$ ,  $t=100\text{ч}$  и все элементы начинают работать в момент времени  $t=0$ .

Решение.

1. С помощью формулы (5.19) получаем

$$P_{(100)} = 2e^{-0,25} - 5e^{-0,2} + 2e^{-0,15} + 2e^{-0,1} = 0,9999.$$

2. Подставляя полученное значение вероятности безотказной работы в формулу (5.20), находим среднюю наработку на отказ

$$T_0 = 49 / (60 \times 0,0005) = 1633,4 \text{ ч.}$$

## **5.4. НАДЕЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ**

Одним из путей повышения надежности системы является введение в нее резервных (дублирующих) элементов. Резервные элементы включаются в систему как бы "параллельно" тем, надежность которых недостаточна.

### **5.4.1. Параллельное соединение резервного оборудования системы**

Рассмотрим самый простой пример резервированной системы - параллельное соединение резервного оборудования системы. В этой схеме все  $n$  одинаковых образцов оборудования работают одновременно, и каждый образец оборудования имеет одинаковую интенсивность отказов. Такая картина наблюдается, например, если все образцы оборудования держатся под рабочим напряжением (так называемый "горячий резерв"), а для исправной работы системы должен быть исправен хотя бы один из  $n$  образцов оборудования.

В этом варианте резервирования применимо правило определения надежности параллельно соединенных независимых элементов. В нашем случае, когда надежности всех элементов одинаковы, надежность блока определяется по формуле (5.9)

$$P = 1 - (1-p)^n.$$

Если система состоит из  $n$  образцов резервного оборудования с различными интенсивностями отказов, то

$$P(t) = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_n). \quad (5.21)$$

Выражение (5.21) представляется как биномиальное распределение. Поэтому ясно, что когда для работы системы требуется по меньшей мере  $k$  исправных из  $n$  образцов оборудования, то

$$P(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}, \quad \text{где } \binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}. \quad (5.22)$$

При постоянной интенсивности отказов  $\lambda$  элементов это выражение принимает вид

$$P(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p_i \frac{(1-p)^n}{(1-p)^i}, \quad (5.22.1)$$

где  $p = \exp(-\lambda t)$ .

#### 5.4.2. Включение резервного оборудования системы замещением

В данной схеме включения  $n$  одинаковых образцов оборудования только один находится все время в работе (рис. 5.11). Когда работающий образец выходит из строя, его непременно отключают, и в работу вступает один из  $(n-1)$  резервных (запасных) элементов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все  $(n-1)$  резервных образцов не будут исчерпаны.

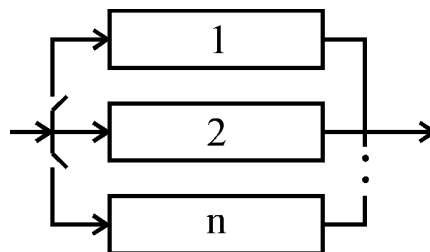


Рис. 5.11. Блок-схема системы включения резервного оборудования системы замещением

Примем для этой системы следующие допущения:

1. Отказ системы происходит, если откажут все  $n$  элементов.
2. Вероятность отказа каждого образца оборудования не зависит от состояния остальных  $(n-1)$  образцов (отказы статистически независимы).
3. Отказывать может только оборудование, находящееся в работе, и условная вероятность отказа в интервале  $t, t+dt$  равна  $\lambda dt$ ; запасное оборудование не может выходить из строя до того, как оно будет включено в работу.
4. Переключающие устройства считаются абсолютно надежными.
5. Все элементы идентичны. Резервные элементы имеют характеристики как новые.

Система способна выполнять требуемые от нее функции, если исправен по крайней мере один из  $n$  образцов оборудования. Таким образом, в этом случае надежность равна просто сумме вероятностей состояний системы, исключая состояние отказа, т.е.

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{n-1} (\lambda t)^i / i! . \quad (5.23)$$

В качестве примера рассмотрим систему, состоящую из двух резервных образцов оборудования, включаемых замещением. Для того, чтобы эта система работала, в момент времени  $t$ , нужно, чтобы к моменту  $t$  были исправны либо оба образца, либо один из двух. Поэтому

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{n-1} (\lambda t)^i / i! = (\exp(-\lambda t))(1 + \lambda t). \quad (5.24)$$

На рис. 5.12 показан график функции  $P(t)$  и для сравнения приведен аналогичный график для нерезервированной системы.

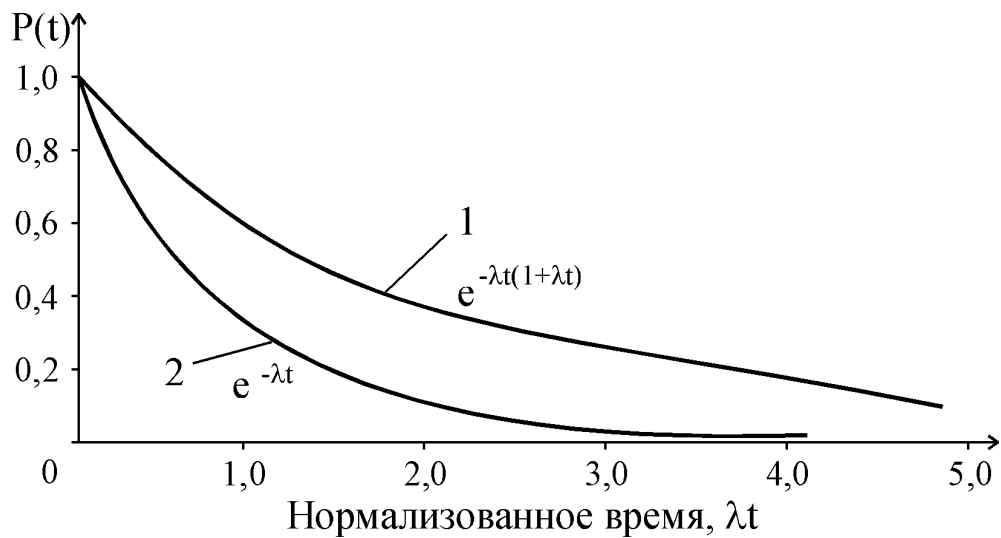


Рис. 5.12. Функции надежности для дублированной системы с включением резерва замещением (1) и нерезервированной системы (2)

Пример 5.11. Система состоит из двух идентичных устройств, одно из которых функционирует, а другое находится в режиме ненагруженного резерва. Интенсивности отказов обоих устройств постоянны. Кроме того, предполагается, что в начале работы резервное устройство имеет такие же характеристики, как и новое. Требуется вычислить вероятность безотказной работы системы в течение 100 ч при условии, что интенсивности отказов устройств  $\lambda=0,001 \text{ ч}^{-1}$ .

Решение. С помощью формулы (5.23) получаем

$$P(t) = (\exp(-\lambda t))(1 + \lambda t).$$

При заданных значениях t и  $\lambda$  вероятность безотказной работы системы составляет

$$P(t) = e^{-0,1}(1+0,1) = 0,9953.$$

Во многих случаях нельзя предполагать, что запасное оборудование не выходит из строя, пока его не включат в работу. Пусть  $\lambda_1$  - интенсивность отказов работающих образцов, а  $\lambda_2$  - резервных или запасных ( $\lambda_2 > 0$ ). В случае дублированной системы функция надежности имеет вид [8]:

$$P(t) = \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2)t) + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2} \exp(-\lambda_1 t) - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2} \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2)t).$$



Данный результат для  $k=2$  можно распространить на случай  $k=n$ . Действительно

$$P(t) = \exp(-\lambda_1(1+\alpha(n-1))t) \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(\exp(\alpha\lambda_1 t) - 1)^k}{\alpha^k k!} \times \right. \\ \left. \times \prod_{j=0}^{k-1} [1 + \alpha(n-1-j)] \right\}, \text{ где } a = \lambda_2/\lambda_1 > 0. \quad (5.25)$$

### 5.4.3. Надежность резервированной системы в случае комбинаций отказов и внешних воздействий

В некоторых случаях отказ системы возникает вследствие определенных комбинаций отказов образцов входящих в систему оборудования и (или) из-за внешних воздействий на эту систему. Рассмотрим, например, метеоспутник с двумя передатчиками информации, один из которых является резервным или запасным. Отказ системы (потеря связи со спутником) возникает при выходе из строя двух передатчиков или в тех случаях, когда солнечная активность создает непрерывные помехи радиосвязи. Если интенсивность отказов работающего передатчика равна  $\lambda$ , а  $\varphi$  - ожидаемая интенсивность появления радиопомех, то функция надежности системы

$$P(t) = \exp(-(\lambda+\varphi)t) + \lambda t \exp(-(\lambda+\varphi)t). \quad (5.26)$$

Данный тип модели также применим в случаях, когда резерв по схеме замещения отсутствует. Например, предположим, что нефтепровод подвергается гидравлическим ударам, причем воздействие незначительными гидроударами происходит с интенсивностью  $\lambda$ , а значительными - с интенсивностью  $\varphi$ . Для разрыва сварных швов (из-за накопления повреждений) трубопроводу следует получить  $n$  малых гидроударов или один значительный.

Здесь состояние процесса разрушения представляется числом ударов (или повреждений), причем один мощный гидроудар равносителен  $n$  малых. Надежность или вероятность того, что трубопровод не будет разрушен действием микроударов к моменту времени  $t$  равна:

$$P(t) = \exp(-(\lambda+\varphi)t) \sum_{i=0}^{n-1} (\lambda t)^i / i!. \quad (5.27)$$

#### 5.4.4. Анализ надежности систем при множественных отказах

Рассмотрим сравнительно новый метод [3] анализа надежности нагруженных элементов в случае статистически независимых и зависимых (множественных) отказов. Следует заметить, что этот метод может быть применен и в случае других моделей и распределений вероятностей. При разработке этого метода предполагается, что для каждого элемента системы существует некоторая вероятность появления множественных отказов.

Как известно, множественные отказы действительно существуют, и для их учета в соответствующие формулы вводится параметр  $\alpha$ . Этот параметр может быть определен на основе опыта эксплуатации резервированных систем или оборудования и представляет собой *долю отказов, вызываемых общей причиной*. Другими словами, параметр  $\alpha$  можно рассматривать как точечную оценку вероятности того, что отказ некоторого элемента относится к числу множественных отказов. При этом можно считать, что интенсивность отказов элемента имеет две взаимоисключающие составляющие, т. е.  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ , где  $\lambda_1$  - постоянная интенсивность статистически независимых отказов элемента,  $\lambda_2$  - интенсивность множественных отказов резервированной системы или элемента. Поскольку  $\alpha = \lambda_2 / \lambda$ , то  $\lambda_2 = \alpha / \lambda$ , и следовательно,  $\lambda_1 = (1 - \alpha) \lambda$ .

Приведем формулы и зависимости для вероятности безотказной работы, интенсивности отказов и средней наработки на отказ в случае систем с параллельным и последовательным соединением элементов, а также систем с  $k$  исправными элементами из  $n$  и систем, элементы которых соединены по мостиковой схеме.

**Система с параллельным соединением элементов** (рис. 5.13) - обычная параллельная схема, к которой последовательно подсоединен один элемент. Параллельная часть (I) схемы отображает независимые отказы в любой системе из  $n$  элементов, а последовательно соединенный элемент (II) - все множественные отказы системы.

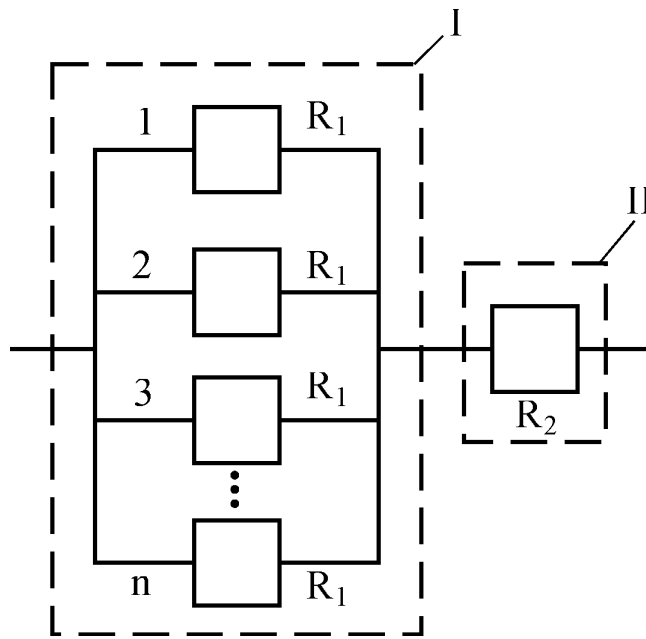


Рис. 5.13. Модифицированная система с параллельным соединением одинаковых элементов

Гипотетический элемент, характеризуемый определенной вероятностью появления множественного отказа, последовательно соединен с элементами, которые характеризуются независимыми отказами. Отказ гипотетического последовательно соединенного элемента (т.е. множественный отказ) приводит к отказу всей системы. Предполагается, что все множественные отказы полностью взаимосвязаны. Вероятность безотказной работы такой системы определяется как  $R_p = \{1 - (1 - R_1)^n\} R_2$ , где  $n$  - число одинаковых элементов;  $R_1$  - вероятность безотказной работы элементов, обусловленная независимыми отказами;  $R_2$  - вероятность безотказной работы системы, обусловленная множественными отказами.

При постоянных интенсивностях отказов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  выражение для вероятности безотказной работы принимает вид

$$R_p(t) = \{1 - (1 - e^{-(1-\alpha)\lambda_1 t})^n\} e^{-\alpha\lambda_2 t}, \quad (5.28)$$

где  $t$  - время.

Влияние множественных отказов на надежность системы с параллельным соединением элементов наглядно демонстрируется с помощью рис. 5.14 - 5.16; при увеличении значения параметра  $\alpha$  вероятность безотказной работы такой системы уменьшается.

Параметр  $\alpha$  принимает значения от 0 до 1. При  $\alpha=0$  модифицированная параллельная схема ведет себя как обычная

параллельная схема, а при  $\alpha=1$  она действует как один элемент, т. е. все отказы системы являются множественными.

Поскольку интенсивность отказов и среднее время наработки на отказ любой системы можно определить с помощью (3.7) и формул

$$\lambda_p(t) = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt},$$

$$T_0 = \int_0^{\infty} R(t) dt,$$

с учетом выражения для  $R_p(t)$  получаем, что интенсивность отказов (рис. 5.17) и средняя наработка на отказ модифицированной системы соответственно равны

$$\lambda_p(t) = \alpha\lambda + n\lambda(1-\alpha) \left\{ \frac{\gamma-1}{\gamma^n-1} \right\}, \tag{5.29}$$

$$T_0^M = \sum_{j=1}^n \frac{(-1)^{j+1} \binom{n}{j}}{\lambda\{j-(j-1)\beta\}}, \quad \text{где } \gamma = \frac{1}{1-e^{-(1-\alpha)\lambda t}}. \tag{5.30}$$

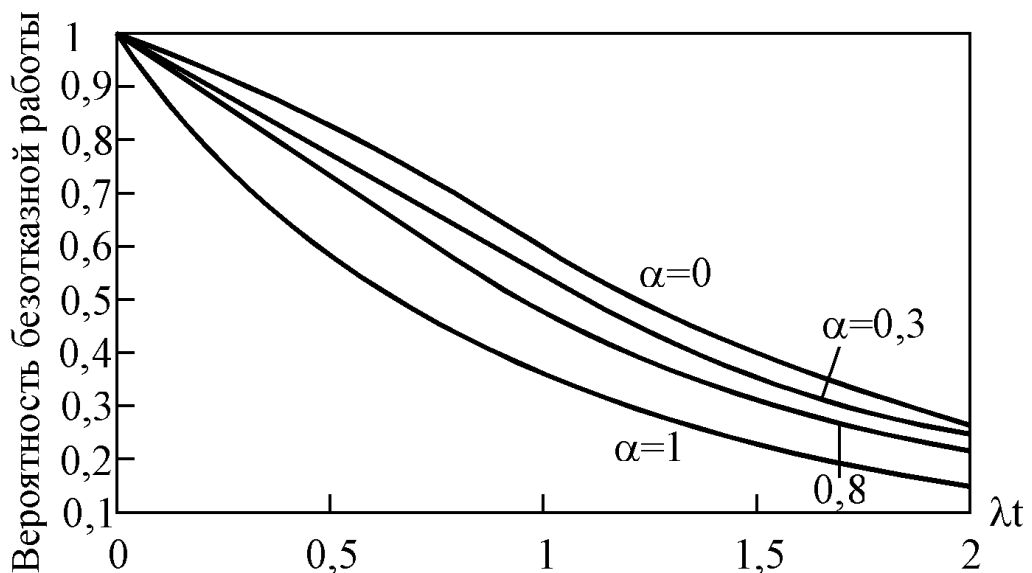


Рис. 5.14. Зависимость вероятности безотказной работы системы с параллельным соединением двух элементов от параметра  $\alpha$

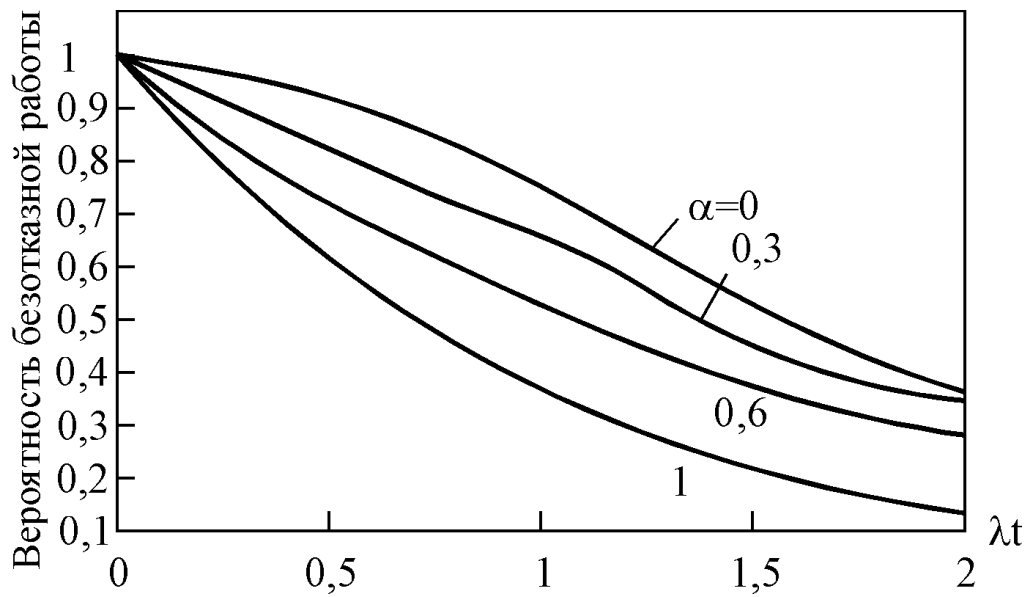


Рис. 5.15. Зависимость вероятности безотказной работы системы с параллельным соединением трех элементов от параметра  $\alpha$

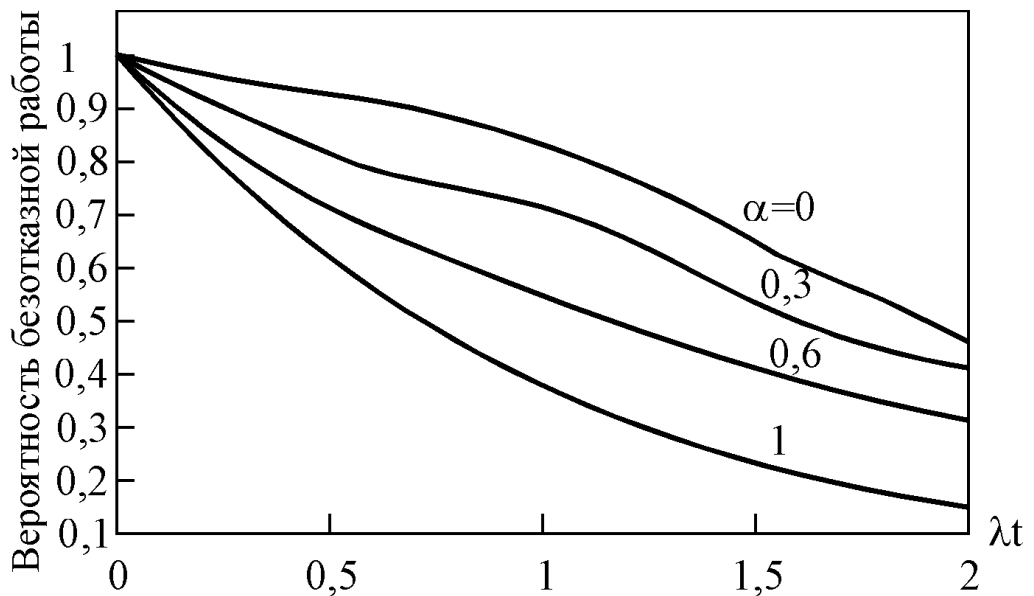


Рис. 5.16. Зависимость вероятности безотказной работы системы с параллельным соединением четырех элементов от параметра  $\alpha$

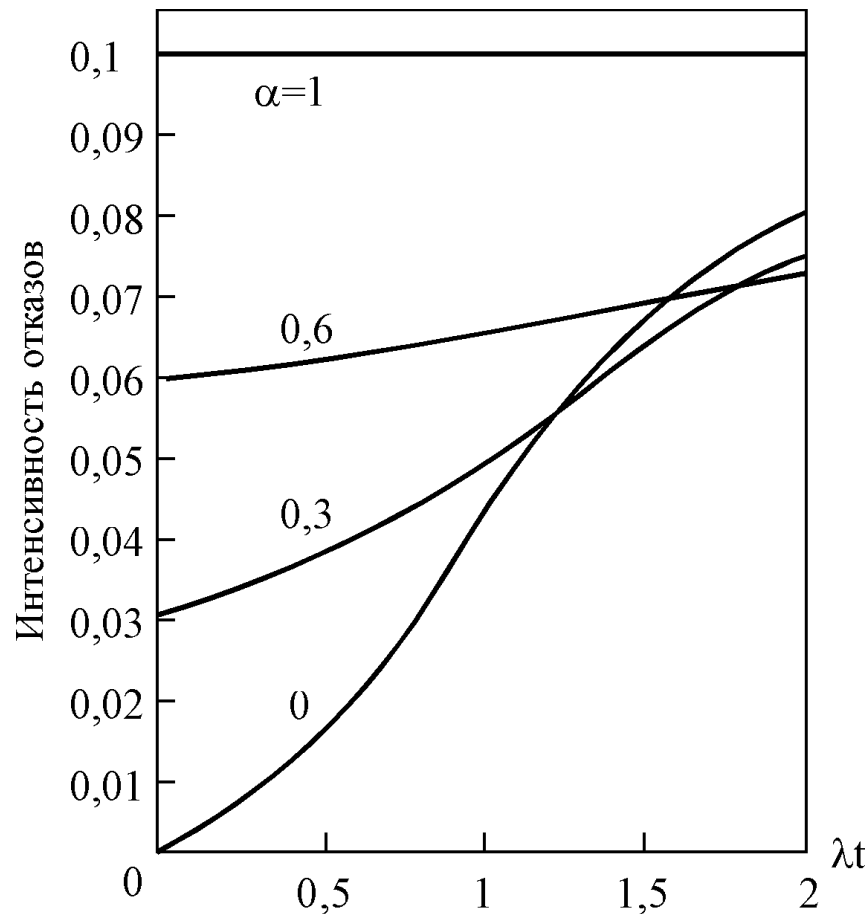


Рис. 5.17. Зависимость интенсивности отказов системы с параллельным соединением четырех элементов от параметра  $\alpha$

Пример 5.12. Требуется определить вероятность безотказной работы системы, состоящей из двух одинаковых параллельно соединенных элементов, если  $\lambda=0,001 \text{ ч}^{-1}$ ;  $\alpha=0,071$ ;  $t=200 \text{ ч}$ .

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из двух одинаковых параллельно соединенных элементов, для которой характерны множественные отказы, равна 0,95769. Вероятность безотказной работы системы, состоящей из двух параллельно соединенных элементов и характеризуемой только независимыми отказами, равна 0,96714.

**Система с  $k$  исправными элементами из  $n$  одинаковых элементов** включает в себя гипотетический элемент, соответствующий множественным отказам и соединенный последовательно с обычной системой типа  $k$  из  $n$ , для которой характерны независимые отказы. Отказ, отображаемый этим гипотетическим элементом, вызывает отказ всей системы. Вероятность безотказной работы модифицированной системы с  $k$  исправными элементами из  $n$  можно вычислить по формуле

$$R_{kn} = \left\{ \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} R_1^r (1 - R_1)^{n-r} \right\} R_2, \quad (5.31)$$

где  $R_1$  - вероятность безотказной работы элемента, для которого характерны независимые отказы;  $R_2$  - вероятность безотказной работы системы с  $k$  исправными элементами из  $n$ , для которой характерны множественные отказы.

При постоянных интенсивностях  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  полученное выражение принимает вид

$$R_{kn}(t) = \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} e^{-r(1-\alpha)\lambda t} \left\{ -e^{-(1-\alpha)\lambda t} \right\}^{n-r} e^{-\alpha\lambda t}. \quad (5.32)$$

Зависимость вероятности безотказной работы от параметра  $\alpha$  для систем с двумя исправными элементами из трех и двумя и тремя исправными элементами из четырех показаны на рис. 5.18-5.20. При увеличении параметра  $\alpha$  вероятность безотказной работы системы уменьшается на небольшую величину ( $\lambda t$ ).

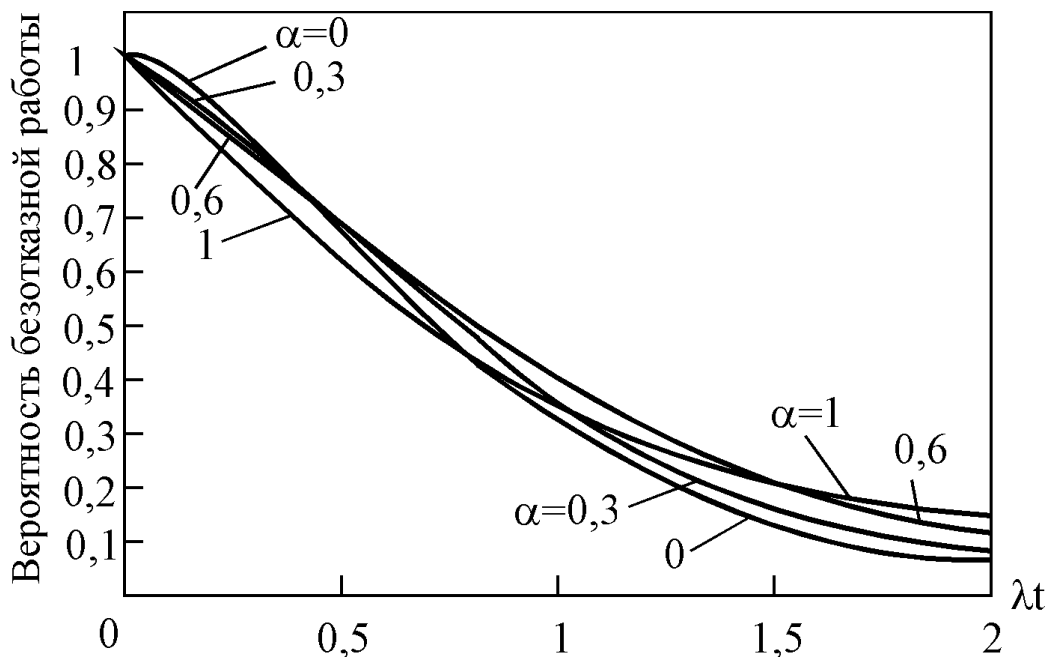


Рис. 5.18. Вероятность безотказной работы системы, сохраняющей работоспособность при отказе двух из  $n$  элементов

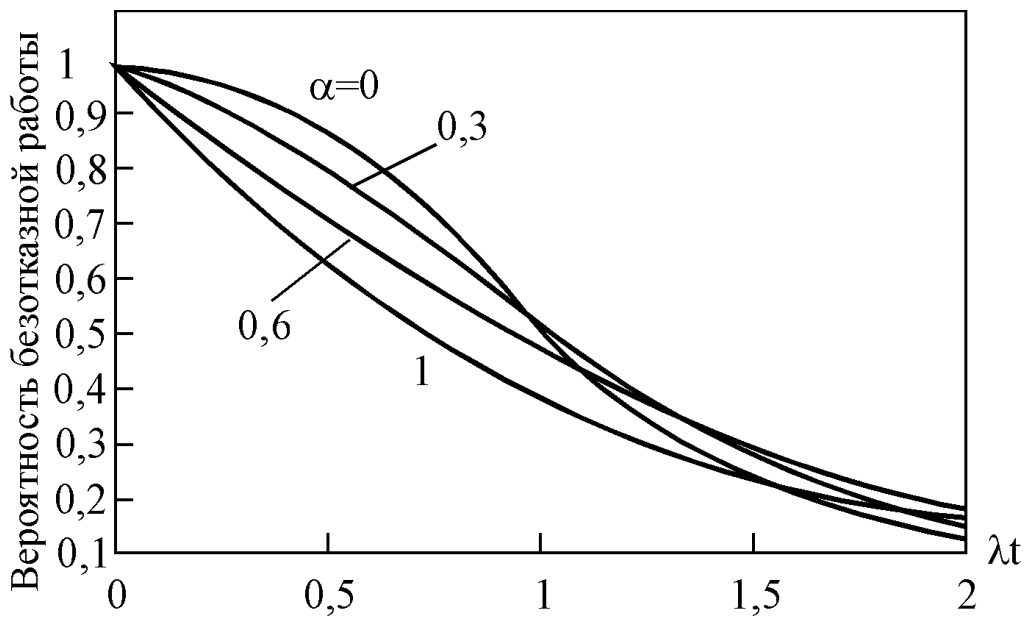


Рис. 5.19. Вероятность безотказной работы системы, сохраняющей работоспособность при отказе двух из четырех элементов

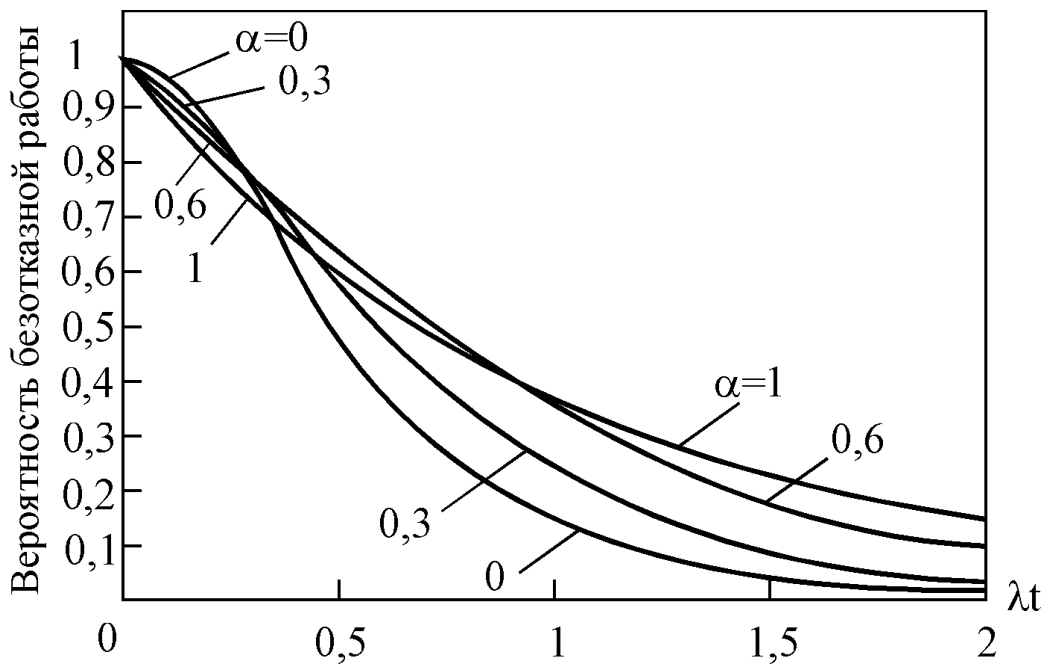


Рис. 5.20. Вероятность безотказной работы системы, сохраняющей работоспособность при отказе трех из четырех элементов

Интенсивность отказов системы с  $k$  исправными элементами из  $n$  и средняя наработка на отказ могут быть определены следующим образом:



$$\lambda_{kn}(t) = \frac{\left\{ \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} [(r\alpha - r - \alpha)\lambda] \theta [\eta^{(n-r)}] + \theta \lambda (n-r)(1-\alpha) \eta^{(n-r-1)} (1-\eta) \right\}}{\sum_{r=k}^n \binom{n}{r} \theta \eta^{(n-r)}}, \quad (5.33)$$

где  $\eta = \{1 - e^{-(1-\beta)\lambda t}\}$ ,

$$\theta = e^{(r\alpha - r - \alpha)\lambda t}$$

и

$$T_0 = \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} \left[ \frac{1}{r - r\alpha + \alpha} - \frac{n-r}{(r - r\alpha + 1)\lambda} + \frac{(n-r)(n-r-1)}{2!(r - r\alpha - \alpha + 2)\lambda} - \frac{(n-r)(n-r-1)(n-r-2)}{3!} \cdot \frac{1}{(r + 3 - r\alpha - 2\alpha)\lambda} + \dots \right]. \quad (5.34)$$

Пример 5.13. Требуется определить вероятность безотказной работы системы с двумя исправными элементами из трех, если  $\lambda=0,0005 \text{ ч}^{-1}$ ;  $\alpha=0,3$ ;  $t=200 \text{ ч}$ .

С помощью выражения для  $R_{kn}$  находим, что вероятность безотказной работы системы, в которой происходили множественные отказы, составляет 0,95772. Отметим, что для системы с независимыми отказами эта вероятность равна 0,97455.

**Система с параллельно-последовательным соединением элементов** соответствует системе, состоящей из одинаковых элементов, для которых характерны независимые отказы, и ряда ветвей, содержащих воображаемые элементы, для которых характерны множественные отказы. Вероятность безотказной работы модифицированной системы с параллельно-последовательным (смешанным) соединением элементов можно определить с помощью формулы  $R_{ps} = \{1 - (1 - R_1^m)^n\} R_2$ , где  $m$  - число одинаковых элементов в ответвлении,  $n$  - число одинаковых ответвлений.

При постоянных интенсивностях отказов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  это выражение принимает вид

$$R_{ps}(t) = [1 - (1 - e^{-n(1-\alpha)\lambda t})^m] e^{-\alpha\lambda t}. \quad (5.35)$$

Интенсивность отказов системы с параллельно-последовательным соединением элементов и средняя наработка на отказ могут быть определены следующим образом:

$$\lambda_{ps}(t) = \alpha\lambda + mn(1-\alpha)\lambda \frac{(\gamma - 1)}{(\gamma^m - 1)}, \quad (5.36)$$

где  $\lambda = 1/[1 - e^{-n(1-\gamma)\lambda t}]$  и

$$T_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \binom{m}{j} (-1)^{j+1}}{\{\lambda\alpha + n\lambda(j - \alpha j)\}}. \quad (5.37)$$

Система, элементы которой соединены по *мостиковой схеме*, соответствует схеме, состоящей из одинаковых элементов, для которых характерны независимые отказы, и последовательно подсоединенного к ним воображаемого элемента, для которого характерны множественные отказы. При множественном отказе гипотетического элемента вся система выходит из строя. Вероятность безотказной работы модифицированной системы с элементами, соединенными по мостиковой схеме, можно вычислить по формуле

$$R_b = \{1 - 2(1 - R_1)^5 + 5(1 - R_1)^4 - 2(1 - R_1)^3 - 2(1 - R_1)^2\} R_2 \quad (5.38)$$

(здесь  $R_b$  - вероятность безотказной работы мостиковой схемы, для которой характерны множественные отказы). Эта формула при постоянных интенсивностях  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  принимает вид

$$R_b(t) = [1 - 2(1 - e^{-At})^5 + 5(1 - e^{-At})^4 - 2(1 - e^{-At})^3 - 2(1 - e^{-At})^2] e^{-\beta\lambda t}. \quad (5.39)$$

(здесь  $A = (1 - \alpha)\lambda$ ). Зависимость безотказной работы системы  $R_b(t)$  для различных параметров  $\alpha$  показана на рис. 5.21. При малых значениях  $\lambda t$  вероятность безотказной работы системы с элементами, соединенными по мостиковой схеме, убывает с увеличением параметра  $\alpha$ .

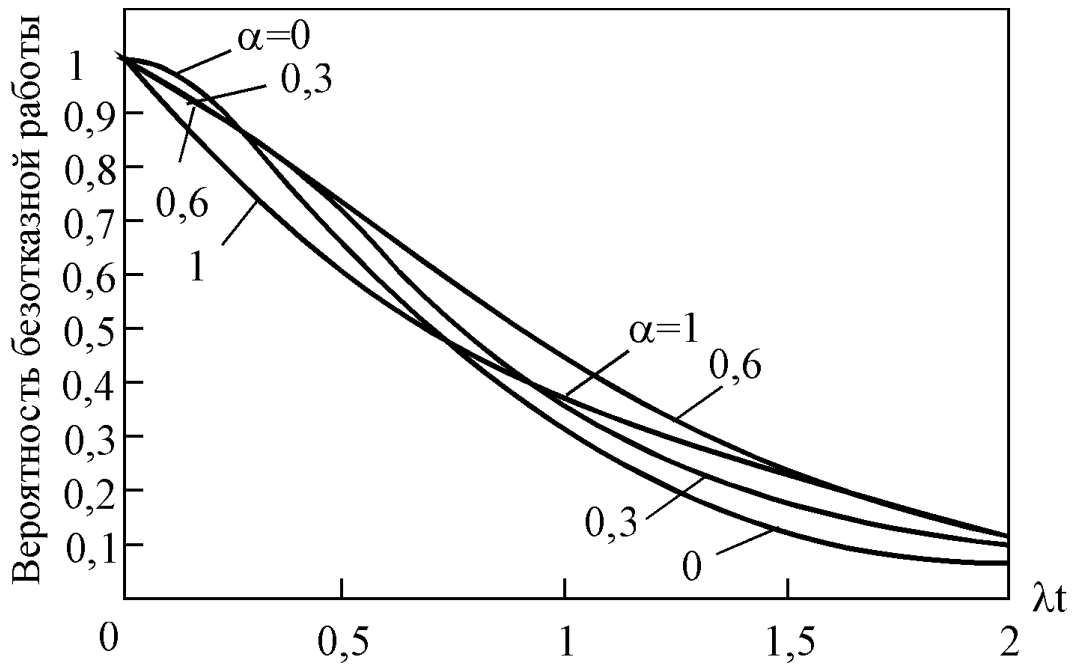


Рис. 5.21. Зависимость вероятности безотказной работы системы, элементы которой соединены по мостиковой схеме, от параметра  $\alpha$

Интенсивность отказов рассматриваемой системы и средняя наработка на отказ могут быть определены следующим образом:

$$\lambda_{\text{кн}}(t) = \beta\lambda + A(-8\pi^5 + 25\pi^4 - 24\pi^3 + 4\pi^2 + 4\pi) + \frac{-2\pi^5 + 5\pi^4 - 2\pi^3 - 2\pi^2}{1 - 2\pi^5 + 5\pi^4 - 2\pi^3 - 2\pi^2}, \quad (5.40)$$

где  $\pi = (1 - e^{-At})$  и

$$T_0 = \frac{2}{(2 - \alpha)\lambda} + \frac{2}{(3 - 2\alpha)\lambda} + \frac{5}{(4 - 3\alpha)\lambda} + \frac{2}{(5 - 4\alpha)\lambda}. \quad (5.41)$$

Пример 5.14. Требуется вычислить вероятность безотказной работы в течение 200 ч для системы с одинаковыми элементами, соединенными по мостиковой схеме, если  $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$  и  $\alpha = 0,3$ .

Используя выражение для  $R_b(t)$ , находим, что вероятность безотказной работы системы с соединением элементов по мостиковой схеме составляет примерно 0,96; для системы с независимыми отказами (т.е. при  $\alpha = 0$ ) эта вероятность равна 0,984.

### 5.4.5. Модель надежности системы с множественными отказами

Для анализа надежности системы, состоящей из двух неодинаковых элементов, для которых характерны множественные отказы, рассмотрим модель, описанную в работе [3].

При построении модели были сделаны следующие допущения и приняты следующие обозначения:

**Допущения** (1) множественные отказы и отказы других типов статистически независимы; (2) множественные отказы связаны с выходом из строя не менее двух элементов; (3) при отказе одного из нагруженных резервированных элементов отказавший элемент восстанавливается, при отказе обоих элементов восстанавливается вся система; (4) интенсивность множественных отказов и интенсивность восстановлений постоянны.

#### Обозначения

$P_0(t)$  - вероятность того, что в момент времени  $t$  оба элемента функционируют;

$P_1(t)$  - вероятность того, что в момент времени  $t$  элемент 1 вышел из строя, а элемент 2 функционирует;

$P_2(t)$  - вероятность того, что в момент времени  $t$  элемент 2 вышел из строя, а элемент 1 функционирует;

$P_3(t)$  - вероятность того, что в момент времени  $t$  элементы 1 и 2 вышли из строя;

$P_4(t)$  - вероятность того, что в момент времени  $t$  имеются специалисты и запасные элементы для восстановления обоих элементов;

$\lambda_i$  - постоянная интенсивность отказов элементов 1 и 2 ( $i=1,2$ );

$\mu_i$  - постоянная интенсивность восстановлений элементов 1 и 2 ( $i=1,2$ );

$\mu_3$  - постоянная интенсивность восстановлений элементов 1 и 2;

$\alpha$  - постоянный коэффициент, характеризующий наличие специалистов и запасных элементов;

$\beta$  - постоянная интенсивность множественных отказов;

$t$  - время.

Рассмотрим три возможных случая восстановления элементов при их одновременном отказе:

**Случай 1.** Запасные элементы, ремонтный инструмент и квалифицированные специалисты имеются для восстановления обоих элементов, т. е. элементы могут быть восстановлены одновременно.

**Случай 2.** Запасные элементы, ремонтный инструмент и квалифицированные специалисты имеются только для восстановления одного элемента, т. е. может быть восстановлен только один элемент.

**Случай 3.** Запасные элементы, ремонтный инструмент и квалифицированные специалисты отсутствуют, и, кроме того, может существовать очередь на ремонтное обслуживание.

Математическая модель системы, изображенной на рис. 5.22, представляет собой следующую систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned}
 P'_0(t) &= -\left(\sum_{i=1}^2 \lambda_i + \beta\right)P_0(t) + \sum_{i=1}^3 P_i(t)\mu_i + P_4(t)\mu_3, \\
 P'_1(t) &= -(\lambda_2 + \mu_1)P_1(t) + P_3(t)\mu_2 + P_0(t)\lambda_1, \\
 P'_2(t) &= -(\lambda_1 + \mu_2)P_2(t) + P_0(t)\lambda_2 + P_3(t)\mu_1, \\
 P'_3(t) &= -\left(\sum_{i=1}^3 \mu_i + \alpha\right)P_3(t) + \sum_{i=1}^2 P_i(t)\lambda_{(3-i)} + P_0(t)\beta, \\
 P'_4(t) &= -\mu_3 P_4(t) + P_3(t)\alpha.
 \end{aligned}
 \tag{5.42}$$

При  $t=0$  имеем  $P_0(0)=1$ , а другие вероятности равны нулю.

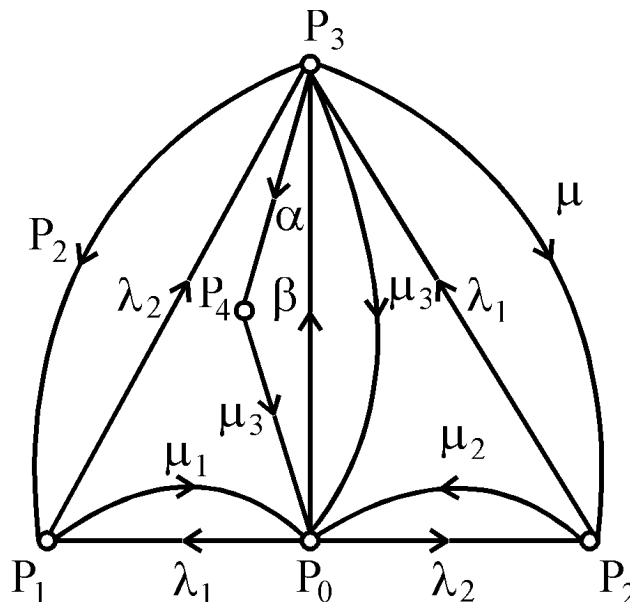


Рис. 5.22. Модель готовности системы в случае множественных отказов

Приравняв в полученных уравнениях производные по времени нулю, для установившегося режима получаем

$$\begin{aligned}
 & -\left(\sum_{i=1}^2 \lambda_i + \beta\right)P_0 + \sum_{i=1}^3 P_i \mu_i + P_4 \mu_3 = 0, \\
 & \quad -(\lambda_2 + \mu_1)P_1 + P_3 \mu_2 + P_0 \lambda_1 = 0, \\
 & \quad -(\lambda_1 + \mu_2)P_2 + P_0 \lambda_2 + P_3 \mu_1 = 0, \\
 & -\left(\sum_{i=1}^3 \mu_i + \alpha\right)P_3 + \sum_{i=1}^2 P_i \lambda_{(3-i)} + P_0 \beta = 0, \\
 & \quad -\mu_3 P_4 + P_3 \alpha = 0, \\
 & \quad \sum_{i=0}^4 P_i - 1 = 0.
 \end{aligned} \tag{5.43}$$

Решая эту совместную систему уравнений, получаем

$$\begin{aligned}
 P_0 = & \left[ \theta \left\{ 1 + \frac{\mu_1(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)} + \frac{\lambda_2 + \mu_1}{\mu_2} + \frac{\alpha(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2 \mu_3} \right\} + \right. \\
 & \left. + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2} - \frac{\mu_1 \lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_2)\mu_2} - \frac{\lambda_1}{\mu_2} - \frac{\alpha \lambda_1}{\mu_2 \mu_3} + 1 \right]^{-1},
 \end{aligned} \tag{5.44}$$

где

$$\theta = \frac{P_1}{P_0},$$

$$\begin{aligned}
 (P_1/P_0) = & \left[ \frac{\lambda_1 \mu_3 + \alpha \lambda_1}{\mu_2} - \left( \frac{\mu_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \mu_3} \right) + \left( \frac{\mu_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_3} \right) + \lambda_1 + \lambda_2 + \beta \right] \times \\
 & \times \left[ \frac{\mu_3(\lambda_2 + \mu_1) + \alpha(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2} + \frac{\mu_1(\lambda_2 + \mu_1)}{(\lambda_1 + \mu_2)} + \mu_1 \right]^{-1},
 \end{aligned} \tag{5.45}$$

$$P_1 = \theta P_0,$$

$$P_2 = \left[ \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2} - \frac{\mu_1 \lambda_1}{\mu_2(\lambda_1 + \mu_2)} \right] P_0 + \frac{\mu_1(\lambda_2 + \mu_1)P_1}{\mu_2(\lambda_1 + \mu_2)},$$

$$P_3 = \frac{(\lambda_2 + \mu_1)P_1}{\mu_2} - \frac{\lambda_1 P_0}{\mu_2},$$

$$P_4 = \frac{\alpha P_1 (\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2 \mu_3} - \frac{\alpha \lambda_1}{\mu_2 \mu_3} P_0.$$

Стационарный коэффициент готовности может быть вычислен по формуле

$$K_r = \sum_{i=0}^2 P_i.$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица значений функции  $y = \exp(-x)$

x	y	x	y	x	y	x	y
0,00	1,000	0,40	0,670	0,80	0,449	3,00	0,050
0,01	0,990	0,41	0,664	0,81	0,445	3,10	0,045
0,02	0,980	0,42	0,657	0,82	0,440	3,20	0,041
0,04	0,961	0,44	0,644	0,84	0,432	3,40	0,033
0,06	0,942	0,46	0,631	0,86	0,423	3,60	0,027
0,08	0,923	0,48	0,619	0,88	0,415	3,80	0,022
0,10	0,905	0,50	0,606	0,90	0,407	4,00	0,0183
0,12	0,887	0,52	0,595	0,92	0,399	4,20	0,0150
0,14	0,869	0,54	0,583	0,94	0,391	4,40	0,0123
0,16	0,852	0,56	0,571	0,96	0,383	4,60	0,0101
0,18	0,835	0,58	0,560	0,98	0,375	4,80	0,0082
0,20	0,819	0,60	0,549	1,00	0,368	5,00	0,0067
0,22	0,803	0,62	0,538	1,20	0,302	5,20	0,0055
0,24	0,787	0,64	0,527	1,40	0,247	5,40	0,0045
0,26	0,771	0,66	0,517	1,60	0,202	5,60	0,0037
0,28	0,756	0,68	0,507	1,80	0,165	5,80	0,0030
0,30	0,741	0,70	0,497	2,00	0,135	6,00	0,0025
0,32	0,726	0,72	0,487	2,20	0,111	6,20	0,0020
0,34	0,712	0,74	0,477	2,40	0,091	6,40	0,0017
0,36	0,698	0,76	0,468	2,60	0,074	6,60	0,0014
0,38	0,684	0,78	0,458	2,80	0,061	6,80	0,0011
0,40	0,670	0,80	0,449	3,00	0,050	7,00	0,0009

Примечание. Для  $x < 0,01$  можно принимать  $y = \exp(-x) \approx 1 - x$ .



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Значения гамма-функции

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,919906
1,01	0,99433	1,26	0,90440	1,51	0,88659	1,76	0,92137
1,02	0,98884	1,27	0,90250	1,52	0,88704	1,77	0,92376
1,03	0,98355	1,28	0,90072	1,53	0,88757	1,78	0,92623
1,04	0,97844	1,29	0,89904	1,54	0,88818	1,79	0,92877
1,05	0,97350	1,30	0,89747	1,55	0,88887	1,80	0,93188
1,06	0,96874	1,31	0,89600	1,56	0,88964	1,81	0,93408
1,07	0,96415	1,32	0,89464	1,57	0,89049	1,82	0,93685
1,08	0,95973	1,33	0,89338	1,58	0,89142	1,83	0,93369
1,09	0,95546	1,34	0,89222	1,59	0,89243	1,84	0,94261
1,10	0,95135	1,35	0,89115	1,60	0,89352	1,85	0,94561
1,11	0,94740	1,36	0,89018	1,61	0,89468	1,86	0,94869
1,12	0,94359	1,37	0,88931	1,62	0,89592	1,87	0,95184
1,13	0,93993	1,38	0,88854	1,63	0,89724	1,88	0,95507
1,14	0,93642	1,39	0,88785	1,64	0,89864	1,89	0,95838
1,15	0,93304	1,40	0,88726	1,65	0,90012	1,90	0,96177
1,16	0,92980	1,41	0,88676	1,66	0,90167	1,91	0,96523
1,17	0,92670	1,42	0,88636	1,67	0,90330	1,92	0,96877
1,18	0,92373	1,43	0,88604	1,68	0,90500	1,93	0,97240
1,19	0,92089	1,44	0,88581	1,69	0,90678	1,94	0,97610
1,20	0,91817	1,45	0,88566	1,70	0,90864	1,95	0,97988
1,21	0,91558	1,46	0,88560	1,71	0,91057	1,96	0,98374
1,22	0,91311	1,47	0,88563	1,72	0,91258	1,97	0,98768
1,23	0,91075	1,48	0,88575	1,73	0,91467	1,98	0,99171
1,24	0,90852	1,49	0,88595	1,74	0,91683	1,99	0,99581
						2,00	1,00000

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

Значение нормальной функции распределения  $F(t)=0,5+\Phi(u)$

u	F(t)	u	F(t)	u	F(t)
-0,00	0,500	-1,60	0,055	0,80	0,788
-0,10	0,460	-1,70	0,044	0,90	0,816
-0,20	0,420	-1,80	0,036	1,00	0,841
-0,30	0,382	-2,00	0,023	1,20	0,885
-0,40	0,344	-2,20	0,014	1,30	0,903
-0,50	0,308	-2,40	0,008	1,40	0,919
-0,60	0,274	-2,60	0,005	1,50	0,933
-0,70	0,242	-2,80	0,003	1,60	0,945
-0,80	0,212	-3,00	0,001	1,70	0,955
-0,90	0,184	0,10	0,540	1,80	0,964
-1,00	0,159	0,20	0,579	2,00	0,977
-1,10	0,136	0,30	0,618	2,20	0,986
-1,20	0,115	0,40	0,655	2,40	0,992
-1,30	0,097	0,50	0,691	2,60	0,995
-1,40	0,080	0,60	0,726	2,80	0,997
-1,50	0,067	0,70	0,758	3,00	0,999

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Значения функции $F(x)$

x		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	0,	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714	5753
0,2	0,	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
0,4	0,	6551	6594	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
0,6	0,	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517	7549
0,8	0,	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133
1,0	0,	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8621
1,2	0,	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997	9015
1,4	0,9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056	3189
1,6	0,9	4520	4630	4738	4855	4950	5053	5154	5254	5352	5449
1,8	0,9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995	7062
2,0	0,9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124	8169
2,1	0,9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537	8574
2,2	0,9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870	8899
2,4	0,99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431	3613
2,6	0,99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6319	6427
2,8	0,99	7445	7523	7599	7673	7744	7814	7882	7948	8012	8074
3,0	0,99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965	8999
3,1	0,999	0324	0646	0957	1260	1553	1836	2112	2378	2636	2886
3,2	0,999	3129	3363	3590	3810	4022	4230	4429	4623	4810	4991
3,4	0,999	6631	6752	6869	6982	7091	7197	7299	7398	7439	7585
3,6	0,999	8409	8469	8527	8583	8637	8689	8739	8787	8834	8879
3,8	0,999	2765	3052	3327	3593	3848	4094	4331	4558	4777	4988
4,0	0,999	6833	6964	7090	7211	7327	7439	7546	7649	7748	7843
4,2	0,999	8665	8723	8778	8832	8882	8931	8978	9023	9066	9107
5,0	0,9999	7134	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание. При  $x \geq 4$  значения  $F(x)$  можно принимать  $\approx 1$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. - М.: Советское радио, 1972. - 552 с.
2. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности: Учебник для вузов. - М.: Высш. шк., 1977. - 160 с.
3. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. - М.: Мир, 1984. - 318 с.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Т.1. Методология. Организация. Терминология/ Под ред. А.И.Рембезы. - М.: Машиностроение, 1986. - 224с.
6. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Т.5. Проектный анализ надежности / Под ред. В.И.Патрушева и А.И.Рембезы. - М.: Машиностроение, 1988. - 316с.
5. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И.А.Ушакова. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
7. Проников А.С. Основы надежности и долговечности. - М.: Изд-во Комитета стандартов, 1969. - 160 с.
8. Сандлер Дж. Техника надежности систем / Пер. с англ. - М.: Наука, 1966. - 330 с.
9. Сорник задач по теории надежности / Под ред. А.М.Половко и И.М.Маликова. - М.: Советское радио, 1972. - 408 с.
10. Хенли Э.Дж., Кумamoto Х. Надежность технических систем и оценка риска: Пер. с англ. В.С. Сыромятникова, Г.С. Деминой; Под общ. ред. В.С.Сыромятникова. -М.: Машиностроение, 1984. -528 с.
11. Элементы теории надежности для проектирования технических систем / Под ред. И.А.Ушакова. - М.: Советское радио, 1978. -280 с.

# МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
О.И. Локтионова  
« 28 » 10 2020 г.



## РАСЧЁТ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЁЖНОСТИ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ОБ ОТКАЗАХ

Методические указания для выполнения  
практической работы по дисциплине  
«Надёжность технических систем и техногенный риск»

Курск 2020

УДК 621.3.019

Составители: В.И. Томаков, М.В. Томаков

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *А.В. Беседин*

**Расчёт количественных характеристик надёжности по статистическим данным об отказах:** методические указания для выполнения практической работы по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Томаков, М.В. Томаков. - Курск, 2020. - 15 с.

Приводятся краткие сведения из теории надёжности и типовые задачи вычисления количественных характеристик надёжности по статистическим данным об отказах невосстанавливаемых систем (элементов, устройств и т. п.).

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 28.10.2020 г. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 0,7. Уч. изд. л. 0,6. Тираж 100 экз. Заказ 352. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет  
305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**Цель практической работы:** приобретение практических навыков, необходимых для вычисления количественных характеристик надёжности по статистическим данным об отказах.

**Задачи практической работы:**

- изучить основные критерии и количественные характеристики надёжности;
- освоить методику вычисления количественных характеристик надёжности по статистическим данным об отказах;
- построить графики зависимости величин от времени и выполнить анализ этих графиков.

**Указания к выполнению практической работы**

Законспектируйте основные положения, определения и математические выражения, описывающие критерии надёжности.

Выполните задания, поясняя процесс решения.

Ответьте письменно на тестовые задания.

**Отчет о выполненной работе**

1. Конспект, включающий основные положения, определения и математические выражения, описывающие критерии надёжности.
2. Необходимые вычисления и графические построения.
3. Письменные ответы на тестовые задания.

Работа должна быть выполнена собственноручно.

Отчет следует предоставить на сброшюрованных листах формата А4 или в отдельной ученической тетради.

**Введение**

Задачи, которые встречаются при определении количественных характеристик надёжности систем, могут быть представлены двумя группами:

- определение количественных характеристик надёжности систем по статистическим данным об отказах;
- определение количественных характеристик надёжности систем при помощи известного аналитического выражения одной ка-

кой-либо характеристики.

При решении задач первой группы используются статистические определения количественных характеристик надежности, при решении задач второй группы - вероятностные определения характеристик и аналитические зависимости между ними.

В предлагаемых методических указаниях представлен ряд задач для определения количественных характеристик надежности технических устройств по *статистическим данным* об отказах.

Данный выпуск методических указаний представлен задачами расчета количественных характеристик надежности невосстанавливаемых систем. Именно такие системы в реальных условиях могут быть источниками потенциальных опасностей и техногенного риска.

## **1 Теоретическая часть**

### **1.1 Критерии и количественные характеристики надежности**

*Критерием надежности* называется признак, по которому можно количественно оценить надежность различных систем, устройств.

К числу наиболее широко применяемых критериев надежности невосстанавливаемых изделий относятся:

- вероятность безотказной работы в течение определенного времени  $P_{(t)}$ ;
- средняя наработка до первого отказа  $T_{cp}$  (час.);
- наработка на отказ  $t_{cp}$  (час.);
- частота отказов  $f(t)$  или  $a(t)$  (1/час или  $ч^{-1}$ );
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$  (1/час или  $ч^{-1}$ ).

Характеристикой надежности следует называть количественное значение критерия надежности конкретного устройства.

Выбор количественных характеристик надежности зависит от вида системы (устройства, элемента).



## 1.2 Критерии надежности невосстанавливаемых устройств

Рассмотрим следующую модель работы устройства.

Пусть в работе (на испытании) находится  $N_0$  элементов и пусть работа считается законченной, если все они отказали. Причем вместо отказавших устройств (элементов, блоков и т.п.) отремонтированные или новые не устанавливаются. Тогда критериями надежности данных изделий являются:

- вероятность безотказной работы  $P(t)$ ;
- частота отказов  $f(t)$  или  $a(t)$ ;
- интенсивность отказов -  $\lambda(t)$ ;
- средняя наработка до первого отказа -  $T_{cp}$ .

**Вероятностью безотказной работы** называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа.

Согласно определению

$$P(t) = P(T > t), \quad (1)$$

где  $T$  - время работы элемента от его включения до первого отказа;  $t$  - время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$\bar{P}(t) = [N_0 - n(t)] / N_0, \quad (2)$$

где  $N_0$  - число элементов в начале работы (испытаний);  $n(t)$  - число отказавших элементов за время  $t$ ;  $\bar{P}(t)$  - статистическая оценка вероятности безотказной работы. При большом числе элементов (изделий)  $N_0$  статистическая оценка  $\bar{P}(t)$  практически совпадает с вероятностью безотказной работы  $P(t)$ . На практике иногда более удобной характеристикой является вероятность отказа  $Q(t)$ .

**Вероятностью отказа** называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникает хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа являются событиями несовместными и противоположными, поэтому

$$Q(t)=P(T\leq t), \quad \bar{Q}(t)=n(t)/N_0, \quad Q(t)=1-P(t). \quad (3)$$

**Частотой отказов** по статистическим данным называется отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу работающих (испытываемых) при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются.

Согласно определению

$$\bar{f}(t) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t, \quad (4)$$

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

**Частота отказов** есть плотность вероятности (или закон распределения) времени работы изделия до первого отказа. Поэтому

$$P(t) = 1 - Q(t), \quad P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (5)$$

**Интенсивностью отказов** по статистическим данным называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

Согласно определению

$$\bar{\lambda}(t) = n(\Delta t) / (N_{cp} \Delta t), \quad (6)$$

где  $N_{cp} = (N_i + N_{i+1}) / 2$  - среднее число исправно работающих элементов в интервале  $\Delta t$ ;  $N_i$  - число изделий, исправно работающих в начале интервала  $\Delta t$ ;  $N_{i+1}$  - число элементов исправно работающих в конце интервала  $\Delta t$ .

Вероятностная оценка характеристики  $\Delta(t)$  находится из выражения

$$\Delta(t) = f(t) / P(t). \quad (7)$$

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right). \quad (8)$$

**Средней наработкой до первого отказа** называется математическое ожидание времени работы элемента до отказа.

Как математическое ожидание,  $T_{cp}$  вычисляется через частоту отказов (плотность распределения времени безотказной работы):

$$M[t] = T_{cp} = \int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt. \quad (9)$$

Так как  $t$  положительно и  $P(0)=1$ , а  $P(\infty)=0$ , то

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (10)$$

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

$$\bar{T}_{cp} = \left( \sum_{i=1}^{N_0} t_i \right) / N_0. \quad (11)$$

где  $t_i$  - время безотказной работы  $i$ -го элемента;  $N_0$  - число исследуемых элементов.

Как видно из формулы (11), для определения средней наработки до первого отказа необходимо знать моменты выхода из строя всех испытуемых элементов. Поэтому для вычисления средней наработки на отказ  $\bar{T}_{cp}$  пользоваться указанной формулой неудобно. Имея данные о количестве вышедших из строя элементов  $n_i$  в каждом  $i$ -м интервале времени, среднюю наработку до первого отказа лучше определять из уравнения

$$\bar{T}_{cp} \approx \left( \sum_{i=1}^m n_i t_{cpi} \right) / N_0. \quad (12)$$

В выражении (12)  $t_{cpi}$  и  $m$  находятся по следующим формулам:

$$t_{cpi} = (t_{i-1} + t_i)/2; \quad m = t_k / \Delta t,$$

где  $t_{i-1}$  - время начала  $i$ -го интервала;  $t_i$  - время конца  $i$ -го интервала;  $t_k$  - время, в течение которого вышли из строя все элементы;

$\Delta t = t_{i-1} - t_i$  - интервал времени.

Из выражений для оценки количественных характеристик

надежности видно, что все характеристики, кроме средней наработки до первого отказа, являются функциями времени. Конкретные выражения для практической оценки количественных характеристик надежности устройств рассматриваются в соответствующей справочной литературе.

Рассмотренные критерии надежности позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемых изделий.

Наличие нескольких критериев вовсе не означает, что всегда нужно оценивать надежность элементов по всем критериям.

Наиболее полно надежность изделий характеризуется частотой отказов  $f(t)$  или  $a(t)$ . Это объясняется тем, что частота отказов является плотностью распределения, а поэтому несет в себе всю информацию о случайном явлении - времени безотказной работы.

Средняя наработка до первого отказа является достаточно наглядной характеристикой надежности. Однако применение этого критерия для оценки надежности сложной системы ограничено в тех случаях, когда:

- время работы системы гораздо меньше среднего времени безотказной работы;
- закон распределения времени безотказной работы не однопараметрический и для достаточно полной оценки требуются моменты высших порядков;
- система резервированная;
- интенсивность отказов не постоянная;
- время работы отдельных частей сложной системы разное.

Интенсивность отказов - наиболее удобная характеристика надежности простейших элементов, так как она позволяет более просто вычислять количественные характеристики надежности сложной системы.

Наиболее целесообразным критерием надежности сложной системы является вероятность безотказной работы. Это объясняется следующими особенностями вероятности безотказной работы:

- она входит в качестве сомножителя в другие, более общие характеристики системы, например, в эффективность и стоимость;
- характеризует изменение надежности во времени;
- может быть получена сравнительно просто расчетным путем в процессе проектирования системы и оценена в процессе ее испытания.

В некоторых случаях критерии невосстанавливаемых систем могут быть критериями надежности восстанавливаемых систем, например: *вероятность безотказной работы, частота отказов, средняя наработка до первого отказа, интенсивность отказов*. Такая необходимость возникает:

- когда имеет смысл оценивать надежность восстанавливаемой системы до первого отказа;
- в случае, когда применяется резервирование с восстановлением отказавших резервных устройств в процессе работы системы, причем отказ всей резервированной системы не допускается.

## **2 Практическая часть: типовые примеры расчёта количественных характеристик надежности невосстанавливаемых устройств**

Следует иметь в виду, что частота, интенсивность отказов и параметр потока отказов, вычисленные по формулам (4) и (6), являются постоянными в диапазоне интервала времени  $\Delta t$ , а функции  $\bar{f}(t)$  или  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  - ступенчатыми кривыми или гистограммами. Для удобства изложения в дальнейшем при решении задач на определение частоты и интенсивности отказов по статистическим данным об отказах устройств (изделий) ответы относятся к середине интервала  $\Delta t$ . При этом результаты вычислений графически представляются не в виде гистограмм, а в виде точек, отнесенных к середине интервалов  $\Delta t_i$  и соединенных плавной кривой.

Рассмотрим типовые примеры решения.

**Пример 1.** Допустим, что на испытание поставлено 1000 однотипных электронных устройств. За 3000 час отказало 80 устройств.

Задание. Требуется определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа электронных устройств в течение 3000 час.

Решение. По формулам (2) и (3) определяем:

$$\bar{P}(t) = [N_0 - n(t)] / N_0 = 1000 - 80 / 1000 = 0,92;$$

$$\bar{Q}(t) = n(t) / N_0 = \bar{Q}(3000) = 1 - P(3000) = 1 - 0,92 = 0,08.$$

Ответ:  $\bar{P}(3000) = 0,92$ ;  $\bar{Q}(3000) = 0,08$ .

**Пример 2.** Допустим, что на испытание поставлено 1000 однотипных электронных устройств. За первые 3000 час отказало 80 устройств, а за интервал времени от 3000 до 4000 час отказало ещё 50 устройств.

Задание. Требуется определить частоту и интенсивность отказов электронных устройств в интервале времени от 3000 до 4000 час.

Решение. По формулам (4) и (6) находим:

$$\bar{a}(3500) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t = 50 / 1000 \times 1000 = 5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1};$$

$$\bar{\lambda}(t) = n(\Delta t) / (N_{\text{ср}} \Delta t) = 50 / 1000 (920 + 870) / 2 \approx 5,6 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}.$$

**Пример 3.** На испытание поставлено  $N_0=400$  однотипных изделий. За время  $t=3000$  час отказало  $n(t)=200$  изделий, за интервал времени  $\Delta t=100$  отказало  $n(\Delta t)=100$  изделий, что поясняет рисунок 1.

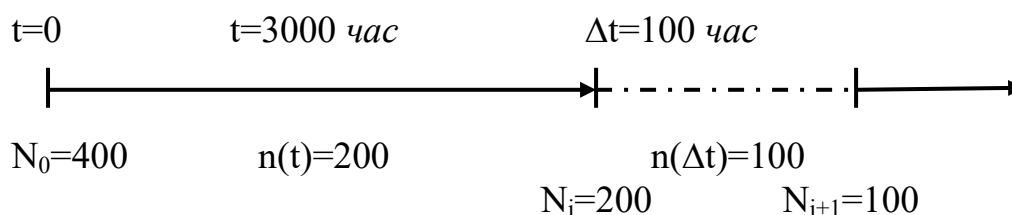


Рисунок 1.3 - Временной график к примеру 3

Задание. Требуется определить  $\bar{P}(3000)$ ,  $\bar{P}(3100)$ ,  $\bar{P}(3050)$ ,  $\bar{a}(3050)$ ,  $\bar{\lambda}(3050)$ .

Решение.

1. По формуле (2) найдем вероятность безотказной работы: для  $t_n=3000$  час (начало интервала):

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

для  $t_k=3000$  час (конец интервала):

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

Определим среднее число исправно работающих образцов в интервале  $\Delta t$ :

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

Число отказавших изделий за время  $t=3050$  час:

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

тогда

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

2. По формуле (4) определяем частоту отказа:

$$\bar{a}(3050) = n(\Delta t)/N_0 \Delta t = 100/100 \times 400 = 2,5 \times 10^{-3} \text{ час}^{-1}.$$

3. По формуле (6) по статистическим данным определяем интенсивность отказа:

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

Интенсивность отказа можно также определить по формуле (7):

$$\bar{\lambda}(3050) = \bar{a}(3050)/\bar{P}(3050) = 0,0025/0,375 = 6,7 \times 10^{-3} \text{ час}^{-1}.$$

**Пример 4.** На испытании находилось  $N_0=1000$  образцов неремонтируемой аппаратуры. Число отказов  $n(\Delta t)$  фиксировалось через каждые 100 час работы ( $\Delta t=100$  час). Данные об отказах приведены в таблице 1.

Задание. Требуется вычислить количественные характеристики надежности, построить зависимости величин характеристик от времени и выполнить анализ этих графиков.

Таблица 1 - Данные об отказах к примеру 4

$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$
0-100	50	1000-1100	15	2000-2100	12
100-200	40	1100-1200	14	2100-2200	13
200-300	32	1200-1300	14	2200-2300	12
300-400	25	1300-1400	13	2300-2400	13
400-500	20	1400-1500	14	2400-2500	14
500-600	17	1500-1600	13	2500-2600	16
600-700	16	1600-1700	13	2600-2700	20
700-800	16	1700-1800	13	2700-2800	25
800-900	15	1800-1900	14	2800-2900	30
900-1000	14	1900-2000	12	2900-3000	40

Решение. Аппаратура относится к классу невосстанавливаемых изделий. Поэтому критериями надежности будут  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_{cp}$ .

Вычислим  $\bar{P}(t)$ . На основании формулы (2) имеем:

$$\bar{P}(100) = N_0 - n(100) / N_0 = 1000 - 50 / 1000 = 0,950;$$

$$\bar{P}(200) = 1000 - 90 / 1000 = 0,910;$$

.....

$$\bar{P}(3000) = 1000 - 575 / 1000 = 0,425.$$

Для расчета характеристик  $a(t)$  и  $\lambda(t)$  применим формулы (4) и (6), тогда:

$$\bar{a}(50) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t = 50 / 1000 \times 100 = 0,50 \times 10^{-3} \text{ час}^{-1};$$

$$\bar{a}(150) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t = 40 / 1000 \times 100 = 0,40 \times 10^{-3} \text{ час}^{-1};$$

.....

$$\bar{a}(2950) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t = 40 / 1000 \times 100 = 0,40 \times 10^{-3} \text{ час}^{-1};$$

$$\bar{\lambda}(50) = n(\Delta t) / \Delta t N_{cp} = 50 / 100(1000 + 950) / 2 = 0,514 \times 10^{-3} \text{ час}^{-1};$$

$$\bar{\lambda}(150) = 40 / 100(950 + 910) / 2 = 0,430 \times 10^{-3} \text{ час}^{-1};$$

.....

$$\bar{\lambda}(2950) = 40 / 100(465 + 425) / 2 = 0,900 \times 10^{-3} \text{ час}^{-1}.$$

Значения  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$  и  $\bar{\lambda}(t)$ , вычисленные для всех  $\Delta t_i$ , сведите в таблицу 2, а затем постройте зависимости характеристик от времени.

Таблица 2 - Вычисленные значения  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$  и  $\bar{\lambda}(t)$  к примеру 4

$\Delta t_i$ , час	$\bar{P}(t)$	$\bar{a}(t)$ , $10^{-3} \text{ час}^{-1}$	$\bar{\lambda}(t)$ , $10^{-3} \text{ час}^{-1}$
0-100	0,950	0,50	0,514
100-200	0,910	0,40	0,430
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
2900-3000	0,425	0,40	0,900

Следует иметь ввиду, что в таблице 2 значения  $\bar{P}(t)$  приводятся для концов интервалов  $\Delta t_i$ , а значения для  $\bar{a}(t)$  и  $\bar{\lambda}(t)$  - для середины



интервалов  $\Delta t_i$ . Поэтому определение  $\bar{P}(t)$  по формуле (7) и данным таблицы 2 не даст значений  $\bar{P}(t)$ , указанных в таблице 2.

Следующим шагом вычисляется среднее время безотказной работы, предположив, что на испытании находились только те образцы, которые отказали.

По формуле (12), учитывая, что в данном случае  $m=t_k/\Delta t=3000/100=30$  и  $N_0=575$ , имеем:

$$\bar{T}_{\text{ср}} \approx \left( \sum_{i=1}^m n_i t_{\text{ср}i} \right) / N_0.$$

### 3 Тестовые задания (с одним ответом)

В отчете расчертите таблицу и заполняйте соответствующие ячейки выбранным ответом.

Таблица 3 - Варианты тестов и ответов

Номера тестовых заданий									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номера ответов									

1. Наиболее целесообразным и понятным критерием надежности невосстанавливаемого объекта является:

1) вероятность безотказной работы; 2) средняя наработка до первого отказа; 3) интенсивность отказов; 4) частота отказов.

2. В теории надежности вероятность безотказной работы в течение определенного времени принято выражать функцией:

1)  $f(t)$ ; 2)  $P(t)$ ; 3)  $Q(t)$ ; 4)  $a(t)$ .

3. Вероятность того, что в пределах заданной наработки не возникнет отказ системы (при условии работоспособности в начальный момент времени) называется:

1) средняя наработка между отказами;  
 2) наработка на отказ;  
 3) наработка до отказа;  
 4) случайный отказ системы за время работы от момента включения.

4. Надежность элемента технической системы или иного другого объекта - это:

1) совокупность свойств, определяющих способность технической системы выполнять определенные задачи в заданных режимах работы в условиях приемлемого технического и экологического риска;

2) свойства объекта, позволяющие сохранять способность объекта выполнять требуемые функции при рабочей эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте, хранении и транспортировке;

3) совокупность свойств объекта, определяющих способность технической системы выполнять определенные задачи в заданных режимах работы;

4) свойства объекта, позволяющие сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в установленных пределах эксплуатации, заданных режимах работы, в заданных условиях эксплуатации, а также при техническом обслуживании, ремонте, хранении и транспортировке;

5) совокупность признаков работоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

5. Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, называется:

1) неработоспособное состояние;

2) повреждение;

3) неисправность;

4) потеря надёжности;

5) отказ.

6. Условная плотность вероятности отказа невозстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник – это:

1) интенсивность отказов; 2) частота отказов; 3) поток отказов; 4) коэффициент готовности; 5) коэффициент оперативной готовности.

7. Интенсивностью отказов по статистическим данным называется:

1) отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу работающих (испытываемых) при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются;

2) отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени;

3) вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникает хотя бы один отказ;

4) вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникает  $n$ -отказов;

5) вероятность того, что в системе за заданное время произойдет один, два, три и т.д. отказов.

8. Интенсивность отказов невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник - это:

1) распределение вероятности отказа во времени;

2) безусловная плотность вероятности отказа;

3) условная плотность вероятности отказа;

4) параметр потока отказов;

5) средняя наработка между отказами.

9. Вероятностная оценка характеристики  $\Delta(t)$  при вычислении интенсивности отказов по статистическим данным находится из выражения:

1)  $(N_i + N_{i+1})/2$ ; 2)  $n(\Delta t)/(N_{cp}\Delta t)$ ; 3)  $[N_0 - n(t)]/N_0$ ; 4)  $f(t)/P(t)$ .

10. Частота отказов по статистическим данным записана выражением:

1)  $n(\Delta t)/(N_{cp}\Delta t)$ ; 2)  $\frac{f(s)}{1-f(s)}$ ; 3)  $1-P(t)$ ; 4)  $f(t)/P(t)$ ; 5)  $n(\Delta t)/N_0\Delta t$ .

## Рекомендуемая литература

1. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / под ред. М. И. Фалеева. - М.: Деловой экспресс, 2002. - 368 с.

# МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
О.И. Локтионова  
« 20 10 » 2020 г.



## РАСЧЁТ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЁЖНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОТКАЗОВ

Методические указания для выполнения  
практической работы по дисциплине  
«Надёжность технических систем и техногенный риск»

Курск 2020

УДК 621.3.019

Составители: В.И. Томаков, М.В. Томаков

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *А.В. Беседин*

**Расчёт количественных характеристик надёжности при использовании математических моделей отказов:** методические указания для выполнения практической работы по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Томаков, М.В. Томаков. - Курск, 2020. - 16 с.

Приводятся краткие сведения из теории надёжности и предлагаются для решения типовые задачи вычисления количественных характеристик надёжности невосстанавливаемых систем (элементов, устройств и т. п.), используя основные законы теории надёжности.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 28.10.2020 г. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 0,7. Уч. изд. л. 0,6. Тираж 100 экз. Заказ 353. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет  
305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**Цель практической работы:** приобретение практических навыков, необходимых для вычисления количественных характеристик надёжности, используя основные законы теории надёжности.

**Задачи практической работы:**

- изучить основные законы теории надёжности для вычисления количественных характеристик и условия их применения;

- освоить методику и приобрести практические навыки вычисления количественных характеристик надёжности, используя основные законы теории надёжности.

**Указания к выполнению практической работы**

Законспектируйте основные положения и определения, описывающие законы теории надёжности, область их применения.

Выполните задания, поясняя процесс решения.

Ответьте письменно на тестовые задания.

**Отчет о выполненной работе**

1. Конспект, включающий основные положения и определения, описывающие законы теории надёжности, область их применения.

2. Необходимые вычисления и графические построения.

3. Письменные ответы на тестовые задания и контрольные вопросы.

Работа должна быть выполнена собственноручно.

Отчет следует предоставить на сброшюрованных листах формата А4 или в отдельной ученической тетради.

**Введение**

Задачи, которые встречаются при определении количественных характеристик надёжности систем, могут быть представлены двумя группами:

- определение количественных характеристик надёжности систем по статистическим данным об отказах (этому было посвящено предыдущее практическое занятие);

- определение количественных характеристик надёжности систем при помощи известного аналитического выражения одной какой-либо характеристики (математической модели).

Для решения задач первой группы используются статистические определения количественных характеристик надёжности.

При решении задач второй группы применяются вероятностные определения характеристик и аналитические зависимости между ними (математические модели). Математические модели - законы теории надежности.

В процессах разработки, испытаний и эксплуатации технических систем (устройств, элементов и т.п.) достаточно широко применяются математические модели, описывающие их поведение в различном временном интервале их работы.

Для описания надежности непрерывно работающих устройств используются непрерывные законы надежности. Для описания показателей надежности систем, работающих в циклическом режиме, используются дискретные законы надежности.

В предлагаемых методических указаниях представлен ряд задач для определения количественных характеристик надежности технических устройств, используя две отмеченные группы законов надежности. Для решения представлены задачи расчета количественных характеристик надежности невосстанавливаемых систем (устройств, элементов и т.п.).

## **1 Теоретическая часть**

Отказы в системах возникают под воздействием разнообразных факторов. Поскольку каждый фактор в свою очередь зависит от многих причин, то *отказы элементов, входящих в состав системы, относятся, как правило, к случайным событиям, а время работы до возникновения отказов - к случайным величинам.*

В инженерной практике *возможны и неслучайные* (детерминированные) *отказы* (отказы, возникновение которых происходит в определенный момент времени, т.е. в момент возникновения вполне определенной причины, так как существует однозначная и определенная связь между причиной отказа и моментом его возникновения). Например, если в цепи аппаратов ошибочно поставлен элемент, неспособный работать при пиковой нагрузке, то всякий раз, когда возникает эта нагрузка, он обязательно перейдет в состояние отказа. Такие отказы выявляются и устраняются в процессе проверки технической документации и испытаний.

Поэтому при анализе надежности систем объектом исследова-

ния являются случайные события и величины.

В качестве теоретических распределений наработки до отказа могут быть использованы любые применяемые в теории вероятностей непрерывные распределения. В принципе можно взять любую кривую, площадь под которой равна единице, и использовать ее в качестве кривой распределения случайной величины. Поэтому прежде чем приступить к инженерным методам расчета надежности и испытаний на надежность, следует рассмотреть закономерности, которым подчиняются случайные события и величины.

### 1.1 Случайное событие

**Случайное событие** - событие (факт, явление), которое в результате опыта может произойти или не произойти. Случайные события (отказы, восстановления, заявки на обслуживание и др.) образуют случайные потоки и случайные процессы. **Поток событий** - последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то отрезки времени. Например, отказы восстанавливаемого устройства образуют поток событий (поток отказов). Под действием потока отказов и потока восстановлений техническое устройство может находиться в различных состояниях (полного отказа, частичного отказа, работоспособное). Переход изделия из одного состояния в другое представляет собой **случайный процесс**.

### 1.2 Случайная величина

**Случайная величина** - величина, которая в результате опыта может принимать то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно. Случайная величина может быть **дискретной** (число отказов за время  $t$ ; число отказавших элементов при наработке заданного объема и т.д.), либо **непрерывной** (время наработки элемента до отказа, время восстановления работоспособности). В теории надежности за случайную величину обычно принимают время работы изделия (время до возникновения отказа).

**Закон распределения случайной величины** - соотношение, устанавливающее связь между значениями случайной величины и их вероятностями. Он может быть представлен формулой, таблицей, многоугольником распределений.



### 1.3 Основные законы распределения, используемые в теории надежности

В теории надежности наибольшее распространение получили следующие законы распределения случайных величин.

Для *дискретных случайных величин* - биномиальный закон; закон Пуассона. Например, закон Пуассона используется тогда, когда необходимо определить вероятность того, что в системе (устройстве) за заданное время произойдет один, два, три и т.д. отказов.

Для *непрерывных случайных величин* - экспоненциальный закон; усеченный нормальный закон; гамма-распределение; закон Вейбулла; закон Релея; логарифмически-нормальное распределение.

Поскольку нас интересует наработка системы (устройства, элемента и т.п.) до первого отказа, при изучении надежности технических систем наиболее часто применяются перечисленные законы для непрерывных случайных величин.

В таблице 1 приведены выражения для оценки количественных характеристик надёжности устройств при некоторых (из числа указанных) законах распределения времени их безотказной работы.

Таблица 1 - Основные соотношения для количественных характеристик надежности при различных законах распределения времени до отказа

Частота отказов (плотность распределения), $f(t)$ или $a(t)$	Вероятность безотказной работы, $P(t)$	Интенсивность отказов, $\lambda(t)$	Средняя наработка до первого отказа, $T_{cp}$
1	2	3	4
Экспоненциальный			
$\lambda \cdot \exp(-\lambda t)$	$\exp(-\lambda t)$	$\lambda = \text{const}$	$1/\lambda$
Рэля			
$t/\sigma^2 \cdot \exp(-t^2/2\sigma^2)$	$\exp(-t^2/2\sigma^2)$	$t/\sigma^2$	$\sqrt{\pi/2} \cdot \sigma$



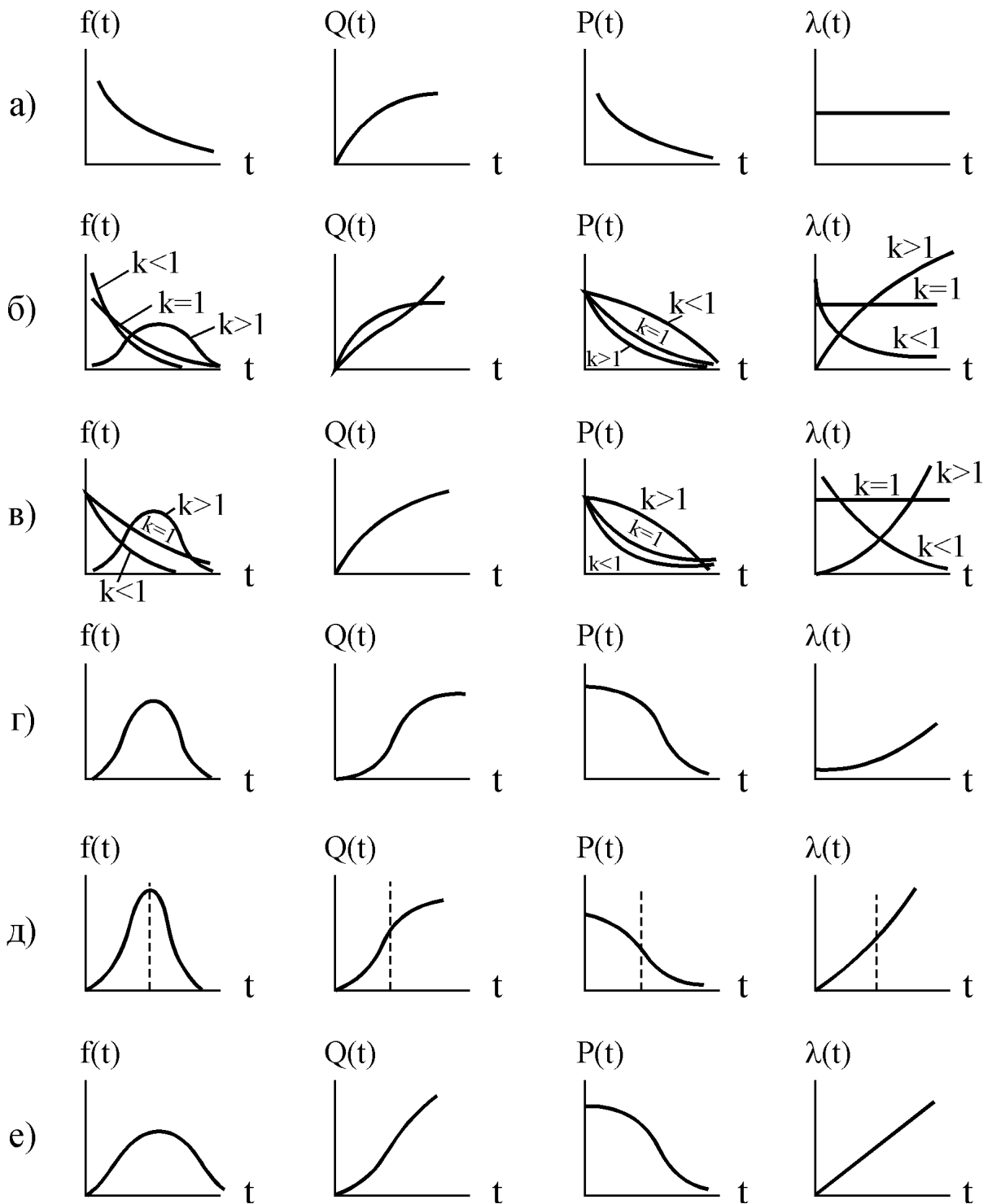


Рисунок 1 - Типичные зависимости количественных характеристик надежности от времени:

а - экспоненциальное; б - Гамма-распределение; в - Вейбулла;  
г - нормальное; д - усеченное нормальное; е - Рэлея

**Задача 2.** Время работы устройства до отказа подчиняется закону распределения Рэлея. Требуется вычислить количественные характеристики надёжности устройства  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$  и  $T_{cp}$  для  $t=500, 1000, 2000$  час, если параметр распределения  $\sigma=1000$  час. Параметр  $\sigma$  - наиболее вероятное значение случайной величины; в непрерывном распределении - точка максимума плотности распределения.

Решение. Используем формулы, приведенные в таблице 1.

Предоставить интерпретацию полученных значений.

**Задача 3.** Время безотказной работы устройства подчиняется закону Вейбулла с параметрами:  $k=1,5$ ;  $\lambda_0=10^{-4}$  час $^{-1}$ , а время его работы  $t=100$  час. Требуется вычислить количественные характеристики надёжности устройства.

Решение. Используем формулы, приведенные в таблице 1.

Для вычисления значения гамма-функции  $\Gamma(x)$  следует воспользоваться приложением Б. В нашем случае  $x=(1/k)+1$ .

Предоставить интерпретацию полученных значений.

Замечание. В выражениях из таблицы 1, используемых для вычисления,  $k$  и  $\lambda_0$  - параметры закона распределения. Параметр  $\lambda_0$  определяет масштаб - при его изменении кривая распределения сжимается или растягивается. При  $k=1$  функция распределения Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением; при  $k<1$  интенсивность отказов будет монотонно убывающей функцией; при  $k>1$  - монотонно возрастающей. Это обстоятельство дает возможность подбирать для опытных данных наиболее подходящие параметры  $k$  и  $\lambda_0$  с тем, чтобы уравнение функции распределения наилучшим образом совпадало с опытными данными.

### 3 Тестовые задания (с одним ответом)

1. Характерной особенностью экспоненциального закона распределения случайной величины, является то, что:

1) *интенсивность отказов элемента (системы) во времени для экспоненциального распределения постоянна;*

2) *интенсивность отказов элемента (системы) во времени для экспоненциального распределения увеличивается;*

3) *интенсивность отказов элемента (системы) во времени для экспоненциального распределения снижается;*

4) интенсивность отказов будет иметь явно выраженный характер возрастающей функции времени от момента включения системы в работу;

5) характерно монотонное возрастание интенсивности отказов с течением времени.

2. На этапе испытаний и эксплуатации расчеты надежности проводятся для ...

1) прогнозирования (предсказания) ожидаемой надежности проектируемой системы;

2) оценки фактических количественных показателей надежности;

3) выбора оптимального варианта структуры системы;

4) установления способа резервирования;

5) установления периодичности профилактики.

3. Соотношение, устанавливающее связь между значениями случайной величины и их вероятностями – это ...

1) факт, явление, которое в результате опыта может произойти или не произойти;

2) функция распределения случайной величины;

3) закон распределения случайной величины;

4) вероятность безотказной работы;

5) критерий надежности невозстановливаемой системы (устройства и т.п.).

4. В теории надежности наибольшее распространение получили различные законы распределения случайных величин. Для дискретных случайных величин применим

1) гамма-распределение;

2) экспоненциальный закон;

3) нормальный закон;

4) биномиальный закон;

5) закон Вейбулла.

5. Экспоненциальный закон распределения случайной величины характеризуется тем, что ...

1) интенсивность отказов элемента (системы) во времени для экспоненциального распределения монотонно увеличивается;

2) интенсивность отказов элемента (системы) во времени для экспоненциального распределения резко снижается;

3) интенсивность отказов имеет явно выраженный характер возрастающей функции времени от момента включения системы в работу;

4) наблюдается монотонное возрастание интенсивности отказов с течением времени;

5) интенсивность отказов элемента (системы) во времени - величина постоянная.

6. В теории надежности наибольшее распространение получили следующие законы распределения случайных величин. Для непрерывных случайных величин применимы ... (укажите группу, в которой правильно представлены эти законы).

1) экспоненциальный закон; нормальный закон; гамма-распределение;

2) закон Вейбулла; биномиальный закон; распределение Рэля;

3) биномиальный закон; закон Пуассона; логарифмически-нормальное распределение;

4) логарифмически-нормальное распределение; нормальный закон; гамма-распределение;

5) нормальный закон; гамма-распределение; биномиальный закон; закон Пуассона.

7. Тогда, когда необходимо определить вероятность того, что в изделии за заданное время произойдет один, два, три и т.д. отказов, для вычислений используется закон

1) Вейбулла; 2) Пуассона; 3) Гамма-распределение;

4) Экспоненциальный; 5) Нормальный.

8. Условная плотность вероятности отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник – это ...

1) интенсивность восстановления; 2) параметр потока отказов; 3) интенсивность отказов; 4) частота отказов;

5) вероятность отказов.



## 4 Контрольные вопросы

Необходимо письменно ответить на контрольные вопросы и тестовые задания по соответствующим вариантам (таблица 4).

Таблица 4 - Варианты заданий

Порядковый номер студента в списке группы									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номера контрольных вопросов									
1, 4	2, 3	4, 7	1, 6	5, 7	3, 6	2, 5	1, 3	3, 5	1, 7

1. При каких ситуациях применим закон Пуассона?
2. Какое обстоятельство является главным условием использования экспоненциального закона распределения отказов?
3. При каких ситуациях применим закон Гамма-распределение случайной величины.
4. В каких случаях и для описания отказов каких устройств имеет место распределение Вейбулла?
5. При наличии каких отказов применяется нормальное распределение случайной величины?
6. Какое существенное отличие имеет усеченное нормальное распределение от нормального распределения?
7. Для каких случаев пригодно распределение Рэля?

## Рекомендуемая литература

1. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / под ред. М. И. Фалеева. - М.: Деловой экспресс, 2002. - 368 с.



### Приложение А

Таблица А1 - Значения функции  $y = e^{-x}$

		X								
X	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,00	1,0000	0,9990	0,9980	0,9970	0,9960	0,9950	0,9940	0,9930	0,9920	0,9910
0,01	0,9900	0,9891	0,9881	0,9871	0,9861	0,9851	0,9841	0,9831	0,9822	0,9812
0,02	0,9802	0,9792	0,9782	0,9773	0,9763	0,9753	0,9743	0,9734	0,9724	0,9714
0,03	0,9704	0,9695	0,9685	0,9675	0,9666	0,9656	0,9646	0,9637	0,9627	0,9618
0,04	0,9608	0,9598	0,9588	0,9579	0,9570	0,9560	0,9550	0,9541	0,9531	0,9522
0,05	0,9512	0,9502	0,9493	0,9484	0,9474	0,9465	0,9455	0,9446	0,9436	0,9427
0,06	0,9418	0,9408	0,9399	0,9389	0,9380	0,9371	0,9361	0,9352	0,9343	0,9333
0,07	0,9324	0,9315	0,9305	0,9226	0,9287	0,9277	0,9258	0,9259	0,9250	0,9240
0,08	0,9231	0,9222	0,9213	0,9204	0,9194	0,9185	0,9176	0,9167	0,9158	0,9148
0,09	0,9139	0,9130	0,9121	0,9112	0,9103	0,9094	0,9085	0,9076	0,9066	0,9057
		X								
X	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,9048	0,8958	0,8869	0,8781	0,8694	0,8607	0,8521	0,8437	0,8353	0,8270
0,2	0,8187	0,8106	0,8025	0,7945	0,7866	0,7788	0,7711	0,7634	0,7558	0,7483
0,3	0,7408	0,7334	0,7261	0,7189	0,7118	0,7047	0,6977	0,6907	0,6839	0,6771
0,4	0,6703	0,6637	0,6570	0,6505	0,6440	0,6376	0,6313	0,6250	0,6188	0,6126
0,5	0,6065	0,6005	0,5945	0,5886	0,5825	0,5769	0,5712	0,5655	0,5599	0,5543
0,6	0,5488	0,5434	0,5379	0,5326	0,5273	0,5220	0,5169	0,5117	0,5066	0,5016
0,7	0,4966	0,4916	0,4868	0,4819	0,4771	0,4724	0,4677	0,4630	0,4584	0,4538
0,8	0,4493	0,4449	0,4404	0,4360	0,4317	0,4274	0,4232	0,4190	0,4148	0,4107
0,9	0,4066	0,4025	0,3985	0,3946	0,3906	0,3867	0,3829	0,3791	0,3753	0,3716
1,0	0,3679	0,3642	0,3606	0,3570	0,3535	0,3499	0,3465	0,3430	0,3396	0,3362
1,1	0,3329	0,3296	0,3263	0,3230	0,3198	0,3166	0,3135	0,3104	0,3073	0,3042
1,2	0,3012	0,2982	0,2952	0,2923	0,2894	0,2865	0,2837	0,2808	0,2780	0,2753
1,3	0,2725	0,2698	0,2671	0,2645	0,2618	0,2592	0,2567	0,2541	0,2516	0,2491
1,4	0,2466	0,2441	0,2417	0,2393	0,2369	0,2346	0,2322	0,2299	0,2276	0,2254
1,5	0,2231	0,2209	0,2187	0,2165	0,2144	0,2122	0,2101	0,2080	0,2060	0,2039
1,6	0,2019	0,1999	0,1979	0,1959	0,1940	0,1920	0,1901	0,1882	0,1864	0,1845
1,7	0,1827	0,1809	0,1791	0,1773	0,1755	0,1738	0,1720	0,1703	0,1686	0,1670



Приложение Б  
Таблица Б1 - Значения гамма-функции  $\Gamma(x)$

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,919906
1,01	0,99433	1,26	0,90440	1,51	0,88659	1,76	0,92137
1,02	0,98884	1,27	0,90250	1,52	0,88704	1,77	0,92376
1,03	0,98355	1,28	0,90072	1,53	0,88757	1,78	0,92623
1,04	0,97844	1,29	0,89904	1,54	0,88818	1,79	0,92877
1,05	0,97350	1,30	0,89747	1,55	0,88887	1,80	0,93188
1,06	0,96874	1,31	0,89600	1,56	0,88964	1,81	0,93408
1,07	0,96415	1,32	0,89464	1,57	0,89049	1,82	0,93685
1,08	0,95973	1,33	0,89338	1,58	0,89142	1,83	0,93369
1,09	0,95546	1,34	0,89222	1,59	0,89243	1,84	0,94261
1,10	0,95135	1,35	0,89115	1,60	0,89352	1,85	0,94561
1,11	0,94740	1,36	0,89018	1,61	0,89468	1,86	0,94869
1,12	0,94359	1,37	0,88931	1,62	0,89592	1,87	0,95184
1,13	0,93993	1,38	0,88854	1,63	0,89724	1,88	0,95507
1,14	0,93642	1,39	0,88785	1,64	0,89864	1,89	0,95838
1,15	0,93304	1,40	0,88726	1,65	0,90012	1,90	0,96177
1,16	0,92980	1,41	0,88676	1,66	0,90167	1,91	0,96523
1,17	0,92670	1,42	0,88636	1,67	0,90330	1,92	0,96877
1,18	0,92373	1,43	0,88604	1,68	0,90500	1,93	0,97240
1,19	0,92089	1,44	0,88581	1,69	0,90678	1,94	0,97610
1,20	0,91817	1,45	0,88566	1,70	0,90864	1,95	0,97988
1,21	0,91558	1,46	0,88560	1,71	0,91057	1,96	0,98374
1,22	0,91311	1,47	0,88563	1,72	0,91258	1,97	0,98768
1,23	0,91075	1,48	0,88575	1,73	0,91467	1,98	0,99171
1,24	0,90852	1,49	0,88595	1,74	0,91683	1,99	0,99581
						2,00	1,00000

# МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
О.А. Локтионова  
« 28 » 2020 г.



## РАСЧЕТ НАДЁЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ОСНОВНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ

Методические указания для выполнения  
практической работы по дисциплине  
«Надёжность технических систем и техногенный риск»

Курск 2020

УДК 621.3.019

Составители: В.И. Томаков, М.В. Томаков

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *А.В. Беседин*

**Расчет надёжности невосстанавливаемых устройств при основном соединении элементов:** методические указания для выполнения практической работы по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Томаков, М.В. Томаков. - Курск, 2020. - 16 с.

Приводятся краткие сведения из теории надёжности и предлагаются для решения типовые задачи вычисления количественных характеристик надёжности невосстанавливаемых устройств при основном соединении элементов.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 28.10.2020 г. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 0,7. Уч. изд. л. 0,6. Тираж 100 экз. Заказ 354. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет  
305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**Цель практической работы:** приобретение практических навыков, необходимых для вычисления количественных характеристик надёжности системы при основном соединении элементов.

**Задачи практической работы:** освоить методику и приобрести практические навыки вычисления количественных характеристик надёжности системы при основном соединении элементов.

### **Указания к выполнению практической работы**

Законспектируйте основные определения и положения, описывающие метод расчета и область его применения.

Выполните задания, поясняя процесс решения.

Ответьте письменно на тестовые задания.

### **Отчет о выполненной работе**

1. Конспект, включающий основные определения и положения, описывающие метод расчета и область и его применения.

2. Необходимые вычисления.

3. Письменные ответы на контрольные вопросы.

Работа должна быть выполнена собственноручно.

Отчет следует предоставить на сброшюрованных листах формата А4 или в отдельной ученической тетради.

## **1 Понятие об основном соединении элементов в системе**

Сложные технические системы (устройства, объекты, изделия и т.п.) состоят из множества соединенных между собой элементов. *Если отказ технической системы (устройства, изделия и т.п.) наступит при отказе одного из её элементов, то такая система (устройство, изделие и т.п.) имеет основное соединение элементов.*

Под основным соединением понимают такое, при котором отказ любого элемента приводит к отказу системы в целом. Основное соединение имеет место в тех случаях, когда в системе все элементы функционально необходимы (т.е. отсутствуют избыточные элементы).

Рассмотрим примеры таких устройств. На рисунке 1 приведена электрическая схема системы освещения.

Вполне понятно, что отказ любого элемента в этой системе, приведёт к отсутствию освещения.

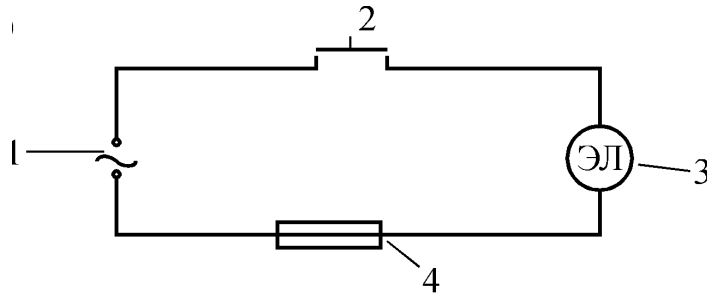


Рисунок 1- Электрическая схема системы освещения:  
1 - электрическая сеть; 2 - выключатель; 3 - электролампа;  
4 - предохранитель

Рисунок 2 демонстрирует схему технологической установки в которой происходит реакция между химическими веществами А и В с получением продукта С.

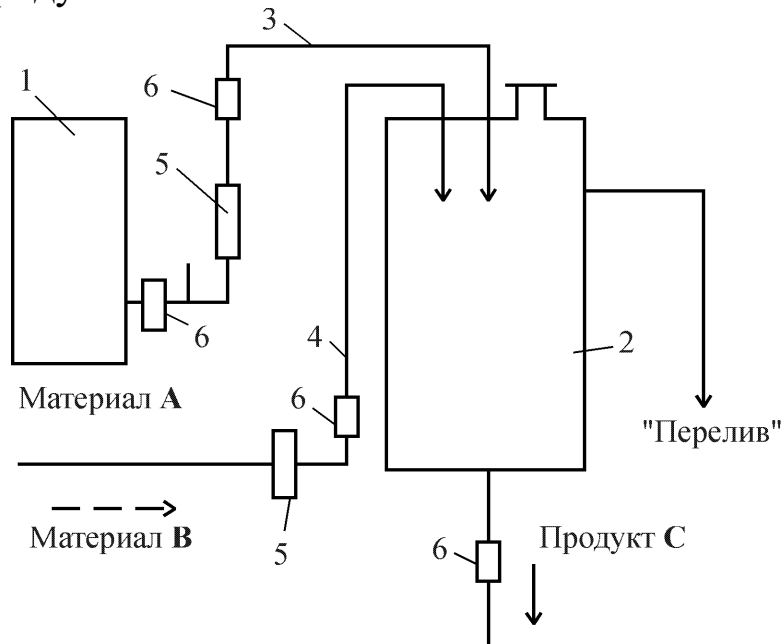


Рисунок 2 - Схема технологической установки:  
1 - расходная емкость; 2 - реактор;  
3,4 - трубопроводы продуктов А и В; 5 - насосы; 6 - запорный клапан

Из анализа технологической схемы, представленной на рисунке 2, следует, что отказ любого устройства (элемента) системы, приведет к отказу всей технической системы.

Подобная ситуация будет характерна и для системы охлаждения и очистки отходящего газа, схема которой показана на рисунке 3.

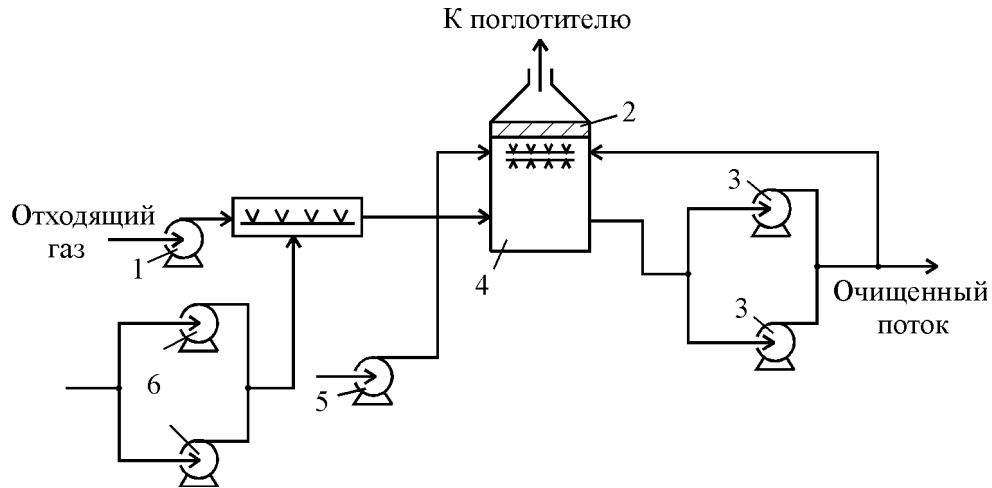


Рисунок 3 - Система охлаждения и очистки отходящего газа:

- 1 - нагнетательный вентилятор; 2 - сетчатая прокладка;  
 3 - блок из двух циркуляционных насосов предварительной очистки газа; 4 - предварительный газоочиститель; 5 - водяной насос;  
 6 - блок из двух насосов системы охлаждения

Можно привести и реальные примеры крупномасштабных отказов больших технических систем, следствием которых стали крупномасштабные чрезвычайные происшествия.

1. Следует, например, выделить чрезвычайное происшествие на территории Надеждинского металлургического завода, принадлежащего «Норникелю». Один из резервуаров хранения дизтоплива на ТЭЦ-3 (принадлежит АО НТЭК, входящему в группу «Норильский никель») в Норильске 29.05.2020 г. получил повреждения из-за резкой просадки опор фундамента, произошла разгерметизация резервуара и утечка около 21 тыс. т топлива. «Норникель» считает основной причиной аварии потепление в условиях вечной мерзлоты, которое привело в движение опоры под топливными цистернами. Росприроднадзор оценил ущерб окружающей среде, нанесенный аварией, почти в 148 млрд. руб.

2. При перекачке авиационного топлива в районе п. Тухард (Ямало-Ненецкий автономный округ) 12.07.2020 г. произошла разгерметизация трубопровода системы транспортирования, принадлежащей Норильсктрансгазу. Вытекло 44,5 т топлива. Часть нефтепродуктов попала в акватории двух рек, создав серьезную опасность для окружающей среды.



## 2 Теоретическая часть

При расчете надежности таких систем (устройств, изделий и т.п.) полагают, что отказ отдельного элемента (узла, блока и т.п.) является событием случайным и независимым.

Тогда вероятность безотказной работы устройства в течение времени  $t$  равна произведению вероятностей безотказной работы ее элементов в течение того же времени. Так как вероятность безотказной работы элементов в течение времени  $t$  можно выразить через интенсивность отказов в виде

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right),$$

то расчетные формулы для вероятности безотказной работы технического устройства при основном соединении элементов можно записать следующим образом:

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

$$P_c(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_1(t) dt\right) \cdot \exp\left(-\int_0^t \lambda_2(t) dt\right) \dots \quad (1)$$

$$\dots \exp\left(-\int_0^t \lambda_N(t) dt\right) = \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^t \lambda_i(t) dt\right).$$

Выражения (1) наиболее общие. Они позволяют определить вероятность безотказной работы изделий до первого отказа при любом законе изменения интенсивности отказов во времени.

*На практике наиболее часто интенсивность отказов изделий является величиной постоянной и подчинена экспоненциальному закону распределения, т. е. для нормального периода работы аппаратуры справедливо условие  $\lambda(t) = \text{const}$ .*

В этом случае выражения для количественных характеристик примут вид:

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_c t) = \exp(-t/T_{cp\ c}), \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i, \quad (2)$$

$$a_c(t) = \lambda_c \exp(-\lambda_c t), \quad T_{cp\ c} = 1/\lambda_c$$

Если все элементы данного типа обладают равной (одинаковой) надежностью, интенсивность отказов системы будет

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i, \quad (3)$$

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

На практике очень часто приходится вычислять вероятность безотказной работы высоконадежных систем. При этом произведение  $\lambda_c t$  значительно меньше единицы, а вероятность безотказной работы  $P(t)$  близка к единице. В этом случае, разложив  $\exp(-\lambda_c t)$  в ряд и ограничившись первыми двумя его членами, с высокой степенью точности можно вычислить  $P(t)$ .

Тогда основные количественные характеристики надежности можно с достаточной для практики точностью вычислить по следующим приближенным формулам:

$$P_c(t) \approx 1 - t \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i = 1 - \lambda_c t, \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i, \quad (4)$$

$$T_c = 1 / \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i = 1/\lambda_c, \quad a_c(t) \approx \lambda_c (1 - \lambda_c t).$$

Вычисление количественных характеристик надежности по приближенным формулам не дает больших ошибок для систем, вероятность безотказной работы которых превышает 0,9, т. е. для  $\lambda t \leq 0,1$ .

При расчете надежности систем часто приходится перемножать вероятности безотказной работы отдельных элементов расчета, возводить их в степень и извлекать корни.

При значениях  $P(t)$ , близких к единице, эти вычисления можно с достаточной для практики точностью выполнять по следующим приближенным формулам:

$$p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_N(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^N q_i(t), \quad (5)$$

$$p_i^N(t) = 1 - Nq_i(t), \quad \sqrt[N]{p_i(t)} = 1 - q_i(t)/N,$$

где  $q_i(t)$  - вероятность отказа  $i$ -го блока.

### 3 Методы расчета

В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на работу изделия, различают прикидочный, ориентировочный и окончательный расчет надежности.

#### 3.1 Прикидочный расчет надёжности

Прикидочный расчет основывается на следующих допущениях:

- все элементы системы (устройства) обладают равной (одинаковой) надежностью;

- отказы всех элементов системы не зависят от времени, т. е.  $\lambda(t) = \text{const}$ ;

- отказ любого элемента приводит к отказу всей системы.

Прикидочный расчет надежности применяется в следующих случаях:

- 1) при проверке требований по надежности, выдвинутых заказчиком в техническом задании (ТЗ) на проектирование изделия;

- 2) при расчете нормативных данных по надежности отдельных блоков, устройств и приборов системы (расчет норм надежности отдельных частей системы);

- 3) для определения минимально допустимого уровня надежности элементов проектируемого изделия;

- 4) при сравнительной оценке надежности отдельных вариантов изделия на этапах предэскизного и эскизного проектирования.

*Прикидочный расчет надежности позволяет судить о принципиальной возможности обеспечения требуемой надежности системы.*

Характеристики надежности рассчитываются по формулам (2)

или (4), при этом  $\lambda_c = N\lambda_{\text{экв}}$ , где  $\lambda_{\text{экв}}$  - эквивалентное<sup>1</sup> значение интенсивности отказов элементов, входящих в устройство.

### 3.2 Ориентировочный расчет надежности

Ориентировочный расчет надежности учитывает влияние на надежность только количества и типов примененных элементов и основывается на следующих допущениях:

- все элементы данного типа обладают равной надежностью, т. е. величины интенсивности отказов  $\lambda_i$  для этих элементов одинаковы;

- все элементы работают в номинальном (нормальном) режиме, предусмотренном техническими условиями;

- интенсивности отказов всех элементов не зависят от времени, т. е. в течение срока службы у элементов, входящих в изделие, отсутствует старение и износ, следовательно,  $\lambda(t)=\text{const}$ ;

- отказы элементов изделия являются событиями случайными и независимыми;

- все элементы изделия работают одновременно. Для определения надежности изделия необходимо знать:

- 1) вид соединения элементов расчета надежности;

- 2) типы элементов, входящих в изделие, и число элементов каждого типа;

- 3) величины интенсивности отказов элементов  $\lambda_i$ , входящие в изделие. Выбор  $\lambda_i$  для каждого типа элементов производится по соответствующим справочным данным.

Таким образом, при ориентировочном расчете надежности достаточно знать структуру системы, номенклатуру примененных элементов и их количество.

Ориентировочный метод расчета надежности используется на этапе эскизного проектирования после разработки принципиальных электрических схем изделий. Этот расчет позволяет определить рациональный состав элементов изделий и наметить пути повышения надежности изделия на стадии эскизного проектирования и проводится по формулам (2) - (4).

---

<sup>1</sup>Эквивалентное - нечто равноценное или соответствующее в каком-либо отношении чему-либо, заменяющее его или служащее его выражением.

### 3.3 Расчет надежности с учетом режимов работы элементов (окончательный расчет)

Окончательный расчет надежности изделия выполняется тогда, когда известны реальные режимы работы элементов после испытания в лабораторных условиях макетов и основных узлов изделия или после тщательного расчета схемы.

Элементы изделия находятся обычно в различных режимах работы, сильно отличающихся от номинальной величины. Это влияет на надежность как изделия в целом, так и отдельных его составляющих частей. Выполнение окончательного расчета надежности возможно только при наличии данных о коэффициентах нагрузки отдельных элементов и при наличии зависимостей интенсивности отказов элементов от их электрической нагрузки, от температуры окружающей среды и ряда многих других факторов.

Эти зависимости приводятся в виде графиков либо их можно рассчитать с помощью так называемых поправочных коэффициентов интенсивности отказов  $\Delta\lambda$ , позволяющих учесть влияние различных факторов на надежность изделия.

Для определения надежности изделия необходимо знать:

- 1) число элементов с разбивкой их по типам и режимам работы;
- 2) зависимости интенсивности отказов элементов  $\lambda_i$  от электрического режима работы (например, электрического, температурного, давления и др.) и заданных внешних условий;
- 3) структуру системы.

В общем случае  $\lambda_i$  зависит от многих разнообразных воздействующих факторов: электрического режима работы данного элемента; окружающей температуры; вибрационных воздействий; механических ударов; линейных ускорений; влажности; воздействия воды; воздействия биологических факторов (грибок, плесень, насекомые); давления; радиоактивного облучения и ряда других факторов.

Знание зависимости интенсивности отказов  $\lambda_i$  от воздействующих факторов является необходимым для правильного использования элементов с целью получения заданной вероятности исправной работы системы за время  $t$ .

Окончательный расчет надежности применяется на этапе технического проектирования изделия. Он обычно возможен тогда, ко-

гда на изделие заполнена так называемая ведомость (карта) режимов работы элементов системы (блоков, узлов, устройств и т. п.). Этот расчет ведется по известным характеристикам надежности деталей, узлов, блоков, механизмов, приборов и т. п., входящих в систему. При этом расчет производится последовательно по принципу «от простого к сложному». С этой целью система расчленяется на отдельные конструктивно самостоятельные части путем деления системы на крупные узлы и блоки, на приборы, а приборов и блоков, других крупных узлов - на более мелкие части и т. д.

Например, система охлаждения и очистки отходящего газа, приведенная на рисунке 3, представлена в виде крупных блоков. Каждый блок, в свою очередь, может быть разбит на более мелкие составные части. Так блок 6, состоящий из двух насосов системы охлаждения, может быть представлен насосами, электроприводом и пусковой аппаратурой, приборами тепловой защиты и т. д.

#### **4 Практическая часть: типовые задачи определения количественных характеристик надежности**

При решении задач используем прикидочный расчет надежности, так как он позволяет судить о принципиальной возможности обеспечения требуемой надежности системы.

Для определения значения функции  $y=e^{-x}$  рекомендуется использовать приложение А.

**Задача 1.** Система состоит из 12600 элементов, средняя интенсивность отказов которых  $\lambda_{\text{ср}}=0,32 \times 10^{-6}$  час<sup>-1</sup>. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение  $t=50$  час и среднюю наработку до первого отказа  $T_{\text{ср с}}$ .

Решение.

1. Интенсивность отказов системы определяем по формуле (3)

$$\lambda_{\text{с}} = \lambda_{\text{ср}} N = 0,32 \times 10^{-6} \times 12600 = 4,032 \times 10^{-3} \text{ час}^{-1}.$$

2. На основании (2) определяем

$$P_{\text{с}}(50) = \exp(-\lambda_{\text{с}} t) = \exp(4,032 \times 10^{-3} \times 50) \approx 0,82.$$

3. Средняя наработка до первого отказа  $T_{\text{ср с}}$  вычисляется по формуле (2)

$$T_{\text{ср с}} = 1/\lambda_{\text{с}} = 1/4,032 \times 10^{-3} = 250 \text{ час}.$$

**Задача 2.** Система состоит из  $N=5$  блоков. Надежность блоков характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени  $t$ , которая равна:  $p_1(t)=0,98$ ;  $p_2(t)=0,99$ ;  $p_3(t)=0,97$ ;  $p_4(t)=0,985$ ;  $p_5(t)=0,975$ . Требуется определить вероятность безотказной работы системы.

Решение выполняется на основании формул (1) и (5). Сравните ответы.

**Задача 3.** Система состоит из трех устройств. Интенсивность отказов электронного устройства равна  $\lambda_1=0,16 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1} = \text{const}$ . Интенсивности отказов двух электромеханических устройств линейно зависят от времени и определяются следующими формулами:

$$\lambda_2=0,23 \cdot 10^{-4} t \text{ час}^{-1}, \lambda_3=0,06 \cdot 10^{-6} t^{2,6} \text{ час}^{-1}.$$

Требуется рассчитать вероятность безотказной работы системы в течение 100 час.

Решение.

1. На основании формулы (1) имеем

$$P_c(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^t \lambda_i(t) dt\right) = \exp\left(-\left[\int_0^t \lambda_1 dt + \int_0^t \lambda_2(t) dt + \int_0^t \lambda_3(t) dt\right]\right).$$

Ответ:  $\approx 0,33$ .

**Задача 4.** Система состоит из трех блоков, средняя наработка до первого отказа которых равна  $T_1=160$  час,  $T_2=320$  час,  $T_3=600$  час. Для блоков справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется определить среднюю наработку до первого отказа системы.

Решение.

1. Необходимо использовать формулы (2) для определения средней наработки до первого отказа системы.

Ответ:  $T_{cp c}=91$  час.

**Задача 5.** Система состоит из двух устройств. Вероятности безотказной работы каждого из них в течение времени  $t=100$  час равны:  $p_1(100)=0,95$ ;  $p_2(100)=0,97=0,92$ . Справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо найти среднюю наработку до первого отказа системы.

Решение.

1. Находим вероятность безотказной работы системы  $P_c(100)$ .

2. Вычисляем интенсивность отказов системы  $\lambda_c$ , воспользовавшись экспоненциальным законом надежности.

3. Вычислив  $\lambda_c$ , определяем среднюю наработку до первого отказа системы  $T_{ср с}$ .

Ответ:  $T_{ср с} = 1200$  час.

**Задача 6.** В системе могут быть использованы только элементы, интенсивность отказов которых равна  $\lambda_i=10^{-5}$  час<sup>-1</sup>. Система имеет 500 элементов. Необходимо найти среднюю наработку до первого отказа и вероятность безотказной работы системы в конце первого часа -  $P_c(1)$ .

Решение.

1. Вычисляем интенсивность отказов системы  $\lambda_c$ .

2. Находим вероятность безотказной работы системы -  $P_c(1)$ .

3. Определяем среднюю наработку до первого отказа системы  $T_{ср с}$ .

Ответы:  $\lambda_c=0,5 \times 10^{-2}$  час<sup>-1</sup>;  $P_c=0,995$ ;  $T_{ср с} = 200$  час.

**Задача 7.** Система состоит из пяти приборов, вероятности исправной работы которых в течение времени  $t=100$  час равны:  $p_1(100)=0,9996$ ;  $p_2(100)=0,9998$ ;  $p_3(100)=0,9996$ ;  $p_4(100)=0,999$ ;  $p_5(100)=0,9998$ . Требуется определить частоту отказов системы  $a_c(t)$  в момент времени  $t=100$  час.

Предполагается, что отказы приборов независимы и для них справедлив экспоненциальный закон надежности.

Решение.

1. По условию задачи отказы приборов независимы, поэтому вероятность безотказной работы системы равна произведению вероятностей безотказной работы приборов - формула (2). Для случая высоконадежных систем  $P_c(100)$  может быть определена по формуле (5). Сравните решения по формулам (2) и (5).

2. Так как вероятность безотказной работы  $P_c(100)$  близка к единице, то для  $P(t)$  интенсивность отказов  $\lambda_c$  можно вычислить, применив формулы (4).

3. Вычислив интенсивность отказов можно рассчитать частоту отказов также в соответствии с формулами (4).

Ответы:  $P_c \approx 0,9978$ ;  $\lambda_c \approx 2,2 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $a_c = 2,195 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.



## 5 Индивидуальные задания

Для системы охлаждения и очистки отходящего газа, приведенной на рисунке 3, необходимо:

- определить вероятность безотказной работы системы в течение времени  $t = 500; 1000; 2000; 3000, 4000, 5000$  час;

- вычислить частоту отказов  $a(t)$ ;

- вычислить среднюю наработку системы  $T_{ср.с}$  до первого отказа;

- построить графические зависимости и прокомментировать их.

Время безотказной работы элементов системы подчинено экспоненциальному закону распределения случайных чисел.

В теоретической части следует кратко изложить суть используемых в работе методов расчета надежности системы, дать определения используемых в работе понятий, определений.

В расчетной части необходимо привести расчеты, поясняя ход решения и применяемые формулы.

Исходные значения  $\lambda$  по вариантам (порядковый номер студента в списке группы).

1.  $\lambda_1 = 2,6 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 4 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 2,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  
 $\lambda_4 = 1,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_5 = 3,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_6 = 3,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_7 = 2,7 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

2.  $\lambda_1 = 3,6 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 5,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  
 $\lambda_4 = 3 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_5 = 3,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_6 = 4,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_7 = 1,2 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

3.  $\lambda_1 = 3,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 2,9 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 5,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  
 $\lambda_4 = 1,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_4 = 4 \times 10^{-5}$  ч<sup>-1</sup>;  $\lambda_6 = 3,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_7 = 1,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

4.  $\lambda_1 = 5,0 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 5,0 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 4,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  
 $\lambda_4 = 2,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_5 = 3,9 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_6 = 1,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_7 = 1,7 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

5.  $\lambda_1 = 1,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 4,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 3,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  
 $\lambda_4 = 2,7 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_5 = 2,7 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_6 = 3,5 \times 10^{-5}$ ;  $\lambda_7 = 2,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

6.  $\lambda_1 = 2,6 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 2,7 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 5,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  
 $\lambda_4 = 1,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_5 = 3,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_6 = 2,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_7 = 7,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

7.  $\lambda_1 = 2,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 4,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 1,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  
 $\lambda_4 = 5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_5 = 2,7 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_6 = 3,5 \times 10^{-5}$ ;  $\lambda_7 = 5,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

8.  $\lambda_1 = 1,1 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 3,1 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 4,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  
 $\lambda_4 = 7,6 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_5 = 3,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_6 = 2,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>;  $\lambda_7 = 5,5 \times 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

9.  $\lambda_1=1,5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_2=5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_3=2,5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  
 $\lambda_4=3,5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_5 = 1,5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_6=2,75 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_7=3,5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ .

10.  $\lambda_1=1,3 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_2=4 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_3=5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_4=1,5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  
 $\lambda_5=1,5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_6=3,5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ;  $\lambda_7=4,5 \times 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ .

## 6 Контрольные вопросы

Необходимо письменно ответить на контрольные вопросы и тестовые задания по соответствующим вариантам (таблица 1).

Таблица 1 - Варианты заданий

Порядковый номер студента в списке группы									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номера контрольных вопросов									
1, 4	2, 3	4, 5	1, 2	5, 6	3, 6	2, 5	1, 6	2, 7	6, 7

1. Какая особенность технической системы (устройства, изделия и т.п.) позволяет отнести её к системам, имеющим основное соединение элементов?

2. В каких случаях применяется прикидочный расчет надежности?

3. В каких случаях в системе имеет место основное соединение элементов?

4. На каких допущениях основывается прикидочный расчет надежности?

5. Что понимается под «основным соединением элементов» в системе?

6. На каких допущениях основывается ориентировочный расчет надежности?

7. О какой возможности системы позволяет судить прикидочный расчет надежности?

## Рекомендуемая литература

1. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / под ред. М. И. Фалеева. - М.: Деловой экспресс, 2002. - 368 с.

### Приложение А

Таблица А1 - Значения функции  $y = e^{-x}$

		X								
X	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,00	1,0000	0,9990	0,9980	0,9970	0,9960	0,9950	0,9940	0,9930	0,9920	0,9910
0,01	0,9900	0,9891	0,9881	0,9871	0,9861	0,9851	0,9841	0,9831	0,9822	0,9812
0,02	0,9802	0,9792	0,9782	0,9773	0,9763	0,9753	0,9743	0,9734	0,9724	0,9714
0,03	0,9704	0,9695	0,9685	0,9675	0,9666	0,9656	0,9646	0,9637	0,9627	0,9618
0,04	0,9608	0,9598	0,9588	0,9579	0,9570	0,9560	0,9550	0,9541	0,9531	0,9522
0,05	0,9512	0,9502	0,9493	0,9484	0,9474	0,9465	0,9455	0,9446	0,9436	0,9427
0,06	0,9418	0,9408	0,9399	0,9389	0,9380	0,9371	0,9361	0,9352	0,9343	0,9333
0,07	0,9324	0,9315	0,9305	0,9226	0,9287	0,9277	0,9258	0,9259	0,9250	0,9240
0,08	0,9231	0,9222	0,9213	0,9204	0,9194	0,9185	0,9176	0,9167	0,9158	0,9148
0,09	0,9139	0,9130	0,9121	0,9112	0,9103	0,9094	0,9085	0,9076	0,9066	0,9057
		X								
X	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,9048	0,8958	0,8869	0,8781	0,8694	0,8607	0,8521	0,8437	0,8353	0,8270
0,2	0,8187	0,8106	0,8025	0,7945	0,7866	0,7788	0,7711	0,7634	0,7558	0,7483
0,3	0,7408	0,7334	0,7261	0,7189	0,7118	0,7047	0,6977	0,6907	0,6839	0,6771
0,4	0,6703	0,6637	0,6570	0,6505	0,6440	0,6376	0,6313	0,6250	0,6188	0,6126
0,5	0,6065	0,6005	0,5945	0,5886	0,5825	0,5769	0,5712	0,5655	0,5599	0,5543
0,6	0,5488	0,5434	0,5379	0,5326	0,5273	0,5220	0,5169	0,5117	0,5066	0,5016
0,7	0,4966	0,4916	0,4868	0,4819	0,4771	0,4724	0,4677	0,4630	0,4584	0,4538
0,8	0,4493	0,4449	0,4404	0,4360	0,4317	0,4274	0,4232	0,4190	0,4148	0,4107
0,9	0,4066	0,4025	0,3985	0,3946	0,3906	0,3867	0,3829	0,3791	0,3753	0,3716
1,0	0,3679	0,3642	0,3606	0,3570	0,3535	0,3499	0,3465	0,3430	0,3396	0,3362
1,1	0,3329	0,3296	0,3263	0,3230	0,3198	0,3166	0,3135	0,3104	0,3073	0,3042
1,2	0,3012	0,2982	0,2952	0,2923	0,2894	0,2865	0,2837	0,2808	0,2780	0,2753
1,3	0,2725	0,2698	0,2671	0,2645	0,2618	0,2592	0,2567	0,2541	0,2516	0,2491
1,4	0,2466	0,2441	0,2417	0,2393	0,2369	0,2346	0,2322	0,2299	0,2276	0,2254
1,5	0,2231	0,2209	0,2187	0,2165	0,2144	0,2122	0,2101	0,2080	0,2060	0,2039
1,6	0,2019	0,1999	0,1979	0,1959	0,1940	0,1920	0,1901	0,1882	0,1864	0,1845
1,7	0,1827	0,1809	0,1791	0,1773	0,1755	0,1738	0,1720	0,1703	0,1686	0,1670
1,8	0,1653	0,1637	0,1620	0,1604	0,1588	0,1572	0,1557	0,1541	0,1526	0,1511
1,9	0,1496	0,1481	0,1466	0,1451	0,1437	0,1423	0,1409	0,1395	0,1381	0,1367
2,0	0,1353	0,1340	0,1327	0,1313	0,1300	0,1287	0,1275	0,1262	0,1249	0,1237
2,2	0,1108	0,1097	0,1086	0,1075	0,1065	0,1054	0,1044	0,1033	0,1023	0,1013
2,3	0,1003	0,0993	0,0983	0,0973	0,0963	0,0954	0,0944	0,0935	0,0926	0,0916
2,4	0,0907	0,0898	0,0889	0,0880	0,0872	0,0863	0,0854	0,0846	0,0837	0,0829
2,5	0,0821	0,0813	0,0805	0,0797	0,0789	0,0781	0,0773	0,0765	0,0758	0,0750
2,6	0,0743	0,0735	0,0728	0,0721	0,0714	0,0707	0,0699	0,0693	0,0686	0,0679
2,7	0,0672	0,0665	0,0659	0,0652	0,0646	0,0639	0,0633	0,0627	0,0620	0,0614
2,8	0,0608	0,0602	0,0596	0,0590	0,0584	0,0578	0,0573	0,0567	0,0561	0,0556
2,9	0,0550	0,0545	0,0539	0,0534	0,0529	0,0523	0,0518	0,0513	0,0508	0,0503