

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»  
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой РЭТЭМ  
\_\_\_\_\_ В.И. Туев  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК

Учебно-методическое пособие к практическим занятиям,  
лабораторному практикуму и самостоятельной работе  
для студентов направления подготовки 280700.62 «Техносферная безопасность»»

Разработчик:  
Доцент кафедры РЭТЭМ  
\_\_\_\_\_ В.М. Захаров

Томск - 2014 г.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих курс «Надёжность технических систем и техногенный риск» по направлению подготовки бакалавров "Техносферная безопасность". Включает методические рекомендации для студентов и преподавателей. Пособие также может быть использовано при изучении таких дисциплин как «Нормирование и снижение загрязнения окружающей среды», «Экология и природопользование» и "Безопасность жизнедеятельности в техносфере".

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение .....	4
1 Практические занятия. Показатели надёжности .....	5
1.1 Основные теоретические положения .....	5
1.2 Показатели безотказности объектов .....	6
1.3 Показатели долговечности .....	9
1.4 Показатели сохраняемости .....	9
1.5 Показатели ремонтпригодности .....	10
1.6 Комплексные показатели надёжности .....	11
1.7 Показатели надёжности невосстанавливаемых объектов .....	13
1.8 Показатели надёжности восстанавливаемых объектов .....	14
1.9 Практические задачи .....	15
2 Лабораторный практикум .....	18
2.1 Расчёт структурной надёжности систем .....	18
2.1.1 Системы типа « <i>m</i> из <i>n</i> » .....	18
2.1.2 Мостиковые схемы .....	18
2.1.3 Комбинированные системы .....	20
2.2 Анализ и расчёт надёжности объекта методом «дерева неисправностей» .....	23
2.2.1 Метод «дерева неисправностей» .....	23
2.2.2 Анализ и расчёт надёжности системы «станок» .....	23
3 Самостоятельная работа .....	27
3.1 Цель и задачи выполнения самостоятельной работы .....	27
3.2 Темы самостоятельной работы .....	27
3.3 Порядок выполнения самостоятельной работы .....	28
3.4 Объём самостоятельной работы и структура реферата .....	28
3.5 Оформление самостоятельной работы .....	29
Список используемой литературы .....	30
Приложение. Титульный лист оформления реферата .....	31

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием современной техники особую важность приобрели многочисленные вопросы повышения эффективности технических систем. Научная дисциплина, изучающая общие методы и приёмы, которых следует придерживаться при проектировании, изготовлении, приёмке, транспортировке и эксплуатации изделий для обеспечения максимальной их эффективности в процессе использования, а также разрабатывающая общие методы расчёта качества изделий, получила название теории надёжности.

Надёжность технических систем – ответственная и творческая область деятельности. Надёжность - это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации. Первостепенное значение надёжности в технике связано с тем, что уровень надёжности в значительной степени определяет развитие техники по основным направлениям: автоматизации производства, интенсификации рабочих процессов, экономии материалов и энергии.

Надёжность сложных технических систем оценивается многими показателями. Для их определения в теории надёжности используется большое число методов анализа, что требует хороших знаний математики.

Настоящее учебное пособие по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенные риски» предназначено для студентов, обучающихся по специальности 280101 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере» и направлению подготовки бакалавров 280700 «Техносферная безопасность», содержит необходимую информацию для выполнения практических занятий, лабораторного практикума и самостоятельной работы с оформлением реферата.

В результате выполнения практических занятий, лабораторного практикума и самостоятельной работы студенты должны расширить свои знания в изучаемой дисциплине, а также овладеть навыками сбора, обработки и анализа научно-технической информации по вопросам обеспечения надёжности технических систем и оформления её в виде реферата по выбранной теме.

# 1 ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

## ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ

### 1.1 Основные теоретические положения

Целью практических занятий является углубление теоретических знаний, формирование целостного представления об основных показателях надёжности технических систем, освоение практических навыков расчёта широко используемых показателей расчёта надёжности технических систем.

Показатели надёжности – это технические характеристики, количественным образом определяющие одно или несколько свойств, составляющих надёжность объекта. Показатель надёжности может иметь размерность (например, среднее время восстановления) или не иметь её (например, вероятность безотказной работы).

Для нормативного обеспечения методов, мероприятий и средств, направленных на достижение требуемого уровня надёжности, используется система стандартов «Надёжность в технике»: ГОСТ 27.001-81 «Система стандартов. Надёжность в технике. Основные положения». Эта система стандартов обеспечивает эффективность мероприятий для достижения требуемой надёжности технических систем.

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 «Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения» для количественной оценки надёжности применяются характеристики отдельных её свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, а также комплексные показатели, характеризующие готовность и эффективность использования технических объектов.

В целях единообразия все показатели надёжности, в соответствии с ГОСТ 27.002-89, определяются как вероятностные характеристики. Для показателей надёжности используются две формы представления: статистическая и вероятностная. Вероятностная форма удобнее при априорных аналитических расчётах надёжности, а статистическая – при экспериментальном исследовании надёжно-

сти технических систем. При практических расчётах будем основываться на статистических оценках вероятности показателей надёжности.

## 1.2 Показатели безотказности объектов

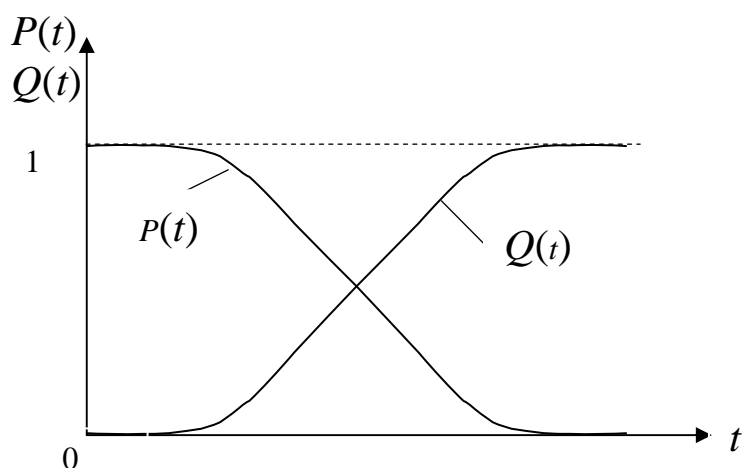
Основной показатель безотказности – вероятность безотказной работы, т.е. вероятность того, что в пределах заданной наработки не возникнет ни одного отказа. Этот показатель определяют в предположении, что в начальный момент времени (момент начала исчисления наработки) объект находится в работоспособном состоянии.

Обозначим через  $t$  время или суммарную наработку объекта. Вероятность безотказной работы на отрезке  $[0, t]$  обозначим как  $P(t)$ . Вероятность безотказной работы является невозрастающей функцией времени и может принимать значения от 1 до 0. Наряду с понятием «вероятность безотказной работы» используется понятие «вероятность отказа»  $Q(t)$ , которая определяется следующим образом: это вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени.

Так как события, заключающиеся в наступлении или не наступлении отказа к моменту наработки  $t$ , являются противоположными, то

$$P(t) + Q(t) = 1 . \quad (1.1)$$

Графики вероятностей безотказной работы и отказа показаны на рисунке 1.1.



Ри-

### сунок 1.1 – Графики функций $P(t)$ и $Q(t)$

Точечные статистические оценки для вероятностей  $P(t)$  и  $Q(t)$  определяются формулами:

- *статистическая оценка вероятности безотказной работы* равна

$$\bar{P}(t) = [N_0 - n(t)] / N_0 , \quad (1.2)$$

где  $n(t)$  – число объектов, отказавших за время  $t$ ;  $N_0$  - число наблюдаемых (испытываемых) объектов при  $t = 0$ ;

- *статистическая оценка вероятности отказа* будет равна

$$\bar{Q}(t) = n(t) / N_0 . \quad (1.3)$$

Пример. На испытание поставлено 1000 образцов однотипных транзисторов. При испытаниях отказавшие элементы исправными не заменялись. За время испытания отказало 10 транзисторов. Следовательно,

$$\bar{P}(t) = 1 - \frac{10}{1000} = 0,99$$

Это означает, что любой транзистор из данной выборки не откажет за время  $t$  с вероятностью  $P(t) = 0,99$ . Соответственно вероятность отказа  $Q(t)$  здесь составит 0,01 (из формул (1.1), (1.3)).

К показателям безотказной работы относят также *среднюю наработку до отказа*, определяемую по формуле

$$\bar{T}_1 = \left( \sum_{i=1}^{N_0} t_i \right) / N_0 , \quad (1.4)$$

где  $t_i$  - наработка до отказа  $i$ -го объекта.

Если известны данные о количестве вышедших из строя объектов  $n_i$  в каждом  $i$ -м интервале времени, то статистическую оценку средней наработки до отказа можно определить из формулы:

$$\bar{T}_1 = \left( \sum_{i=1}^m n_i t_{\bar{\alpha}i} \right) / N_0, \quad (1.5)$$

где  $t_{cpi} = (t_{i-1} + t_i)/2$ ;  $m = t_k / \Delta t$ ;  $t_{i-1}$  - время начала  $i$ -го,  $t_i$  - время конца  $i$ -го интервала;  $t_k$  - время, в течение которого вышли из строя все объекты;  $\Delta t = (t_{i-1} - t_i)$  – интервал времени.

Отметим, что средняя наработка до отказа оценивается не только в часах (годах), но и в циклах, километрах пробега и т.п.

*Гамма-процентная наработка до отказа ( $t_\gamma$ )* – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Её определяют из уравнения

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100},$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы.

Перечисленные показатели введены применительно к невосстанавливаемым объектам, а также к таким отказам восстанавливаемых объектов, возникновение которых по возможности должно быть исключено.

Применительно к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы, вместо *средней наработки до отказа* используют другой показатель – среднюю наработку на отказ – это отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Статистическая оценка средней наработки на отказ вычисляется по формулам

- для **одного** объекта:  $\bar{T}(t) = \left( \sum_{i=1}^n t_i \right) / n$ ; (1.6)

- для  $N$  наблюдаемых в течение времени  $t$  объектов:

$$\bar{T}(t) = \left( \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} \right) / \sum_{j=1}^N n_j \quad (1.7)$$



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

### 1.3 Показатели долговечности

Большинство показателей долговечности аналогично показателям безотказности невосстанавливаемых объектов, если в определениях момент наступления первого отказа заменить на момент достижения предельного состояния. Например, *гамма-процентный ресурс* определяют как *суммарную наработку*, в течение которой в заданных режимах и условиях применения объект не достигает предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Аналогично вводят *гамма-процентный срок службы* – календарную продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с выраженной в процентах вероятностью  $\gamma$ . Применительно к крупносерийным объектам и массовым комплектующим изделиям обычно используют понятия *среднего ресурса* и *среднего срока службы*. В терминах вероятностных моделей эти показатели равны *математическим ожиданиям суммарной наработки и календарной продолжительности до достижения предельного состояния*. При применении показателей долговечности указывают начало отсчета и вид действий после наступления предельного состояния (например, *гамма-процентный ресурс* от второго капитального ремонта до списания). Показатели долговечности, отсчитываемые от ввода объекта в эксплуатацию до окончательного снятия с эксплуатации, называют *гамма-процентным полным ресурсом*, *средним полным ресурсом* и т.п.

### 1.4 Показатели сохраняемости

Аналогично вводят показатели сохраняемости. Так, *гамма-процентный срок сохраняемости* определяют как *срок хранения*, в течение которого параметры объекта, характеризующие способность объекта выполнять требуемые функции, будут оставаться в пределах, задаваемых из условий сохраняемости, с выраженной в

процентах вероятностью  $\gamma$ . *А средний срок сохраняемости* – это математическое ожидание срока сохраняемости.

Необходимо отличать показатели долговечности и сохраняемости от внешне сходных с ними «назначенных» сроков службы, хранения и т.п. Цель установления «назначенного» срока службы и «назначенного» ресурса – обеспечить принудительное и заблаговременное прекращение применения объекта из требований безопасности или технико-экономических соображений. Для объектов, подлежащих длительному хранению, вводят *назначенный срок хранения*, по истечении которого дальнейшее хранение недопустимо, например, из требований безопасности. При достижении объектом *назначенного ресурса* (назначенного срока службы, назначенного срока хранения), в зависимости от назначения объекта, особенности его эксплуатации, технического состояния и других факторов, он может быть списан, направлен в средний или капитальный ремонт, передан для применения не по назначению, переконсервирован (при хранении). При определенных условиях после обследования может быть принято решение о продолжении эксплуатации.

*Назначенный срок службы, назначенный ресурс и назначенный срок хранения* являются технико-эксплуатационными характеристиками. Однако при установлении их численных значений следует принимать во внимание прогнозируемый или достигнутый уровень надежности. В частности, если поставлено требование безопасности, то назначенный срок службы (ресурс) должен отвечать значениям вероятности безотказной работы по отношению к критическим отказам, весьма близким к единице. Из соображений безопасности может быть также введен коэффициент запаса по времени.

### 1.5 Показатели ремонтпригодности

Различают две группы показателей ремонтпригодности. Первая группа аналогична показателям безотказности. К ним относятся *вероятность восстановления*, т.е. вероятность того, что продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного значения. Квантиль этой ве-

роятности – продолжительность времени, в течение которого восстановление работоспособности будет осуществлено с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, – называют *гамма-процентным временем восстановления*. Аналогично вводят *среднее время восстановления и параметр потока восстановления*.

*Интенсивность восстановления* – это условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено. Другая группа показателей ремонтпригодности характеризует затраты по поддержанию работоспособного состояния объекта. К ним относят *среднюю трудоемкость восстановления* – это математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа. Ее обычно измеряют в человеко-часах. Большинство показателей этого типа – численные характеристики трудоемкости технического обслуживания, ремонта, диагностирования, – строго говоря, не относятся к показателям надежности.

#### 1.6 Комплексные показатели надёжности

Комплексные показатели надежности характеризуют два или более числа свойств, входящих в определение надежности, например, безотказность и ремонтпригодность.

Первую группу комплексных показателей составляют те, которые являются количественной характеристикой готовности объекта к выполнению требуемых функций.

*Коэффициент готовности* – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Родственное понятие – *коэффициент оперативной готовности* характеризует готовность объекта выполнять требуемые функции в течение заданного отрезка времени. Этот коэффициент равен вероятности того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в пределах которых применение объекта по назначению не

предусматривается), при условии, что начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного отрезка времени. Очевидно, что коэффициент готовности по математической структуре аналогичен вероятности безотказной работы  $P(t)$ . Различают *стационарный и нестационарный коэффициенты готовности*, а также *средний коэффициент готовности*.

*Вторая группа комплексных показателей надежности* включает величины типа математического ожидания. К этой группе принадлежит, например, *коэффициент технического использования*. Он равен отношению математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и продолжительности простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период. В стационарных условиях коэффициент технического использования  $k$  также может быть выражен через отношение математических ожиданий:

$$k = \frac{T}{(T + T_a)} \cdot \quad (1.8)$$

Здесь  $T$  – *средняя наработка на отказ*;  $T_a$  – *среднее время восстановления*.

*Коэффициент технического использования* характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации. *Коэффициент сохранения эффективности* характеризует степень влияния отказов объекта на эффективность его применения по назначению.

Некоторые *комплексные показатели надежности* относятся к пограничной области, объединяющей факторы надежности, технологической и экономической эффективности. Так, *коэффициент сохранения эффективности* равен отношению значения *показателя эффективности использования* объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к *номинальному значению этого показателя*, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

В последнее время начинают использовать комплексные показатели, включающие чисто *экономические факторы*. Например, в некоторых программах повышения надежности наряду со стандартными показателями надежности введен показатель – «*суммарная стоимость жизненного цикла*». Этот технико-экономический показатель включает в себя расходы на обеспечение и поддержание надежности объекта на всех этапах жизненного цикла, начиная с проектирования и кончая демонтажом или ликвидацией.

Рассматривая показатели надёжности, мы указывали область их применения, а именно: для невосстанавливаемых объектов и для восстанавливаемых объектов. Сгруппируем теперь показатели надёжности для этих объектов.

#### 1.7 Показатели надёжности невосстанавливаемых объектов

Статистические оценки показателей надёжности невосстанавливаемых объектов рассчитываются по следующим формулам:

- 1) *оценка вероятности безотказной работы* – формула (1.2);
- 2) *оценка вероятности отказа* – формула (1.3);
- 3) *оценка частоты отказов*:

$$\bar{a}(t) = n(\Delta t) / \Delta t N_0 \quad , \quad (1.9)$$

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

- 4) *оценка интенсивности отказов*:

$$\bar{\lambda}(t) = n(\Delta t) / \Delta t N_{\bar{n}\delta} \quad , \quad (1.10)$$

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

- 5) *оценка средней наработки до отказа* – формула (1.4);

Если известны данные о количестве вышедших из строя объектов  $n_i$  в каждом  $i$ -м интервале времени, то статистическую оценку средней наработки до отказа можно определить из формулы (1.5).

## 1.8 Показатели надёжности восстанавливаемых объектов

Наиболее часто нормируемыми показателями надёжности восстанавливаемых объектов являются:

1) *средняя наработка на отказ*:

- для *одного* объекта – формула (1.6);
- для  $N$  наблюдаемых в течение времени  $t$  объектов – формула (1.7);

2) параметр потока отказов:

$$\bar{\mu}(t) = n(\Delta t) / (N \Delta t); \quad (1.11)$$

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

3) *коэффициент готовности*:

$$\bar{k} = t_p / (t_p + t_i), \quad t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi}, \quad t_i = \sum_{i=1}^n t_{ii}, \quad (1.12)$$

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

4) *коэффициент вынужденного простоя*:

$$\bar{K}_i = t_i / (t_p + t_i). \quad (1.13)$$

Между коэффициентом готовности  $k$  и коэффициентом вынужденного простоя  $K_n$  существует зависимость:

$$k = 1 - K_n. \quad (1.14)$$

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

Такая *необходимость возникает*:

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

## 1.9 Практические задачи

### Задача 1

Допустим, что на испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За 3000 ч отказало 80 ламп, требуется определить вероятность безотказной работы  $P(t)$  и вероятность отказа  $Q(t)$  в течение 3000 ч

Дано:

$$N_0 = 1000 \text{ шт.}$$

$$\Delta t = 3000 \text{ ч}$$

$$n = 80 \text{ шт.}$$

Найти:

$$P(t)$$

$$Q(t)$$

*Решение:* используйте формулы (1.1) - (1.3).

### Задача 2

Допустим, что на испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За первые 3000 ч отказало 80 ламп, а за интервал времени 3000–4000 ч отказало еще 50 ламп. Требуется определить частоту  $a(\Delta t)$  и интенсивность  $\lambda(\Delta t)$  отказов электронных ламп в промежутке времени  $\Delta t = 3000\text{--}4000$  ч.

Дано:

$$N_0 = 1000 \text{ шт.}$$

$$\Delta t_1 = 3000 \text{ ч}$$

$$n_1 = 80 \text{ шт.}$$

$$\Delta t_2 = [3000, 4000]$$

$$n_2 = 50 \text{ шт.}$$

Найти:

$$a(\Delta t_2)$$

$$\lambda(\Delta t_2)$$

*Решение:* используйте формулы (1.9) и (1.10).

### Задача 3

На испытание поставлено  $N_0 = 400$  изделий. За время  $t = 3000$  ч отказало  $n(t) = 200$  изделий, за интервал  $\Delta t = 100$  ч отказало  $n(\Delta t) = 100$  изделий. Требуется определить вероятность безотказной работы за 3000 ч, вероятность безотказной работы за 3100 ч, вероятность безотказной работы за 3050 ч, также частоту отказов  $a(\dots)$  и интенсивность отказов  $\lambda(\dots)$ .

Дано:

$$N_0 = 400 \text{ шт.}$$

$$t = 3000 \text{ ч}; \quad \Delta t = 100 \text{ ч}$$

$$n = 200 \text{ шт.}; \quad n(\Delta t) = 100 \text{ шт.}$$

Найти:

$$P(3000); \quad a(3000); \quad \lambda(3000)$$

$$P(3100); \quad a(3100); \quad \lambda(3100)$$

$$P(3050); \quad a(3050); \quad \lambda(3050)$$

*Решение:* используйте формулы (1.2), (1.9), (1.10).

#### Задача 4

В течение некоторого периода времени производилось наблюдение за работой *одного объекта*. За весь период зарегистрировано  $n = 15$  отказов. До начала наблюдений объект проработал 258 ч, к концу наблюдения наработка составила 1233 ч. Определить среднюю наработку на отказ  $t_{cp}$ .

Дано:

$$n = 15$$

$$t_1 = 258 \text{ ч}$$

$$t_2 = 1233 \text{ ч}$$

Найти:

$$t_{cp}$$

*Решение:* используйте формулу (1.6) для одного объекта.

#### Задача 5

Производилось наблюдение за работой *трёх однотипных объектов*. За период наблюдения было зафиксировано по первому объекту 6 отказов, по второму – 11 отказов, третьему – 8 отказов. Нарботка первого объекта  $t_1 = 181$  ч, второго  $t_2 = 329$  ч, третьего  $t_3 = 245$  ч. Определить наработку объектов на отказ.

Дано:

$$N_0 = 3 \text{ шт.}$$

$$n_1 = 6 \text{ шт.}; \quad t_1 = 181 \text{ ч.}$$

$$n_2 = 11 \text{ шт.}; \quad t_2 = 329 \text{ ч.}$$

$$n_3 = 8 \text{ шт.}; \quad t_3 = 245 \text{ ч.}$$

Найти:

$$t_{cp}$$

*Решение:* используйте ту же формулу (1.6), но записанную для трёх объектов.

#### Задача 6



Система состоит из 5 приборов, причем отказ любого одного из них ведет к отказу системы. Известно, что первый отказал 34 раза в течение 952 ч работы, второй – 24 раза в течение 960 ч работы, а остальные приборы в течение 210 ч работы отказали 4, 6 и 5 раз соответственно. Требуется определить наработку на отказ системы в целом.

Дано:

$$N_0 = 5 \text{ шт.}$$

$$n_1 = 34 \text{ шт.}; \quad t_1 = 952 \text{ ч.}$$

$$n_2 = 24 \text{ шт.}; \quad t_2 = 960 \text{ ч.}$$

$$n_3 = 4 \text{ шт.}; \quad t_{3-5} = 210 \text{ ч.}$$

$$n_4 = 6 \text{ шт.}; \quad n_5 = 5 \text{ шт.}$$

Найти:

$$t_{cp}$$

*Решение:* используйте следующие соотношения:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^{N_0} \lambda_i; \quad t_{cp} = \frac{1}{\lambda_{\bar{n}}}$$

Определяется интенсивность отказов для каждого прибора по формуле (1.10), где  $N_{cp}$  – среднее число исправно работающих изделий в интервале  $\Delta t$ , ( $N_{cp}=1$ ).

### Задача 7

За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зафиксировано 8 отказов. Время восстановления составило:  $t_1 = 12$  мин,  $t_2 = 23$  мин,  $t_3 = 15$  мин,  $t_4 = 9$  мин,  $t_5 = 17$  мин,  $t_6 = 28$  мин,  $t_7 = 25$  мин,  $t_8 = 31$  мин. Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры.

Дано:

$$n = 8 \text{ отказов}$$

$$t_1 = 12 \text{ мин}; \quad t_5 = 17 \text{ мин}$$

$$t_2 = 23 \text{ мин}; \quad t_6 = 28 \text{ мин}$$

$$t_3 = 15 \text{ мин}; \quad t_7 = 25 \text{ мин}$$

$$t_4 = 9 \text{ мин}; \quad t_8 = 31 \text{ мин}$$

Найти:

$$t_{cp.в}$$

*Решение:* используйте формулу (1.6).

## 2 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

### 2.1 Расчёт структурной надёжности систем

Показатели надёжности ТС рассчитываются на основании предположения, что система и любой её элемент могут находиться только в одном из двух возможных состояний – работоспособном и неработоспособном, и отказы элементов независимы. Состояние системы (работоспособное или неработоспособное) определяется состоянием элементов и их сочетанием. Поэтому теоретически возможно свести расчет безотказности любой ТС к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы.

Такой метод (*метод прямого перебора*) практически универсален и может использоваться при расчете любых ТС. Однако при большом количестве элементов системы  $n$  такой путь становится нереальным из-за большого объема вычислений (например, при  $n = 10$  число возможных состояний системы составляет  $2^n = 1024$ , при  $n = 20$  превышает  $10^6$ , при  $n = 30$  – более  $10^9$ ). Поэтому на практике используют более эффективные и экономичные методы расчета, не связанные с большим объемом вычислений. Возможность применения таких методов связана со структурой ТС. Отметим кратко ряд таких методов.

#### 2.1.1 Системы типа « $m$ из $n$ »

Систему типа « $m$  из  $n$ » можно рассматривать как вариант системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из  $n$  элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее  $m$  элементов ( $m < n$ ). Для расчёта надёжности систем типа « $m$  из  $n$ » при сравнительно небольшом количестве элементов можно воспользоваться методом прямого перебора.

## 2.1.2 Мостиковые схемы

**Мостиковой структурой** называется параллельное соединение последовательных цепочек элементов с диагональными элементами, включенными между узлами различных параллельных ветвей (рисунок 2.1, а, б). Работоспособность такой системы зависит не только от количества отказавших элементов, но и от их положения в структурной схеме. При одновременном отказе элементов 1 и 4, или 2 и 5, или 2, 3 и 4 и т. д. схема окажется неработоспособной. Но отказ элементов 1 и 5, или 2 и 4 к отказу системы не приводит.

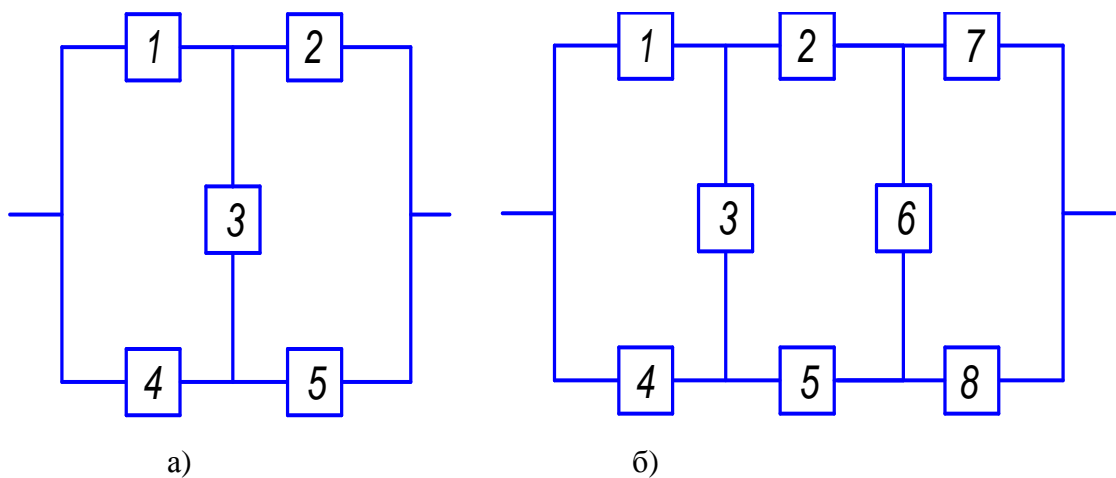


Рисунок 2.1 - Мостиковые схемы

Для расчёта надёжности мостиковых систем можно воспользоваться *методом прямого перебора*, как для систем « $t$  из  $n$ », но при анализе работоспособности каждого состояния системы необходимо учитывать не только число отказавших элементов, но и их положение в схеме. Вероятность безотказной работы системы определяется как сумма вероятностей всех работоспособных состояний:

$$\begin{aligned}
 P = & p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + \\
 & + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + \\
 & + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + \\
 & + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5 + \\
 & + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + \\
 & + q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Как уже отмечалось, метод прямого перебора эффективен только при малом количестве элементов  $n$ , поскольку число состояний системы составляет  $2^n$ . Например, для схемы на рисунке 2.1 их количество составит уже  $2^8 = 256$ . Если рассматривать только сочетания, отвечающие работоспособному (или неработоспособному) состоянию системы в целом, то это упростит расчёт.

### 2.1.3 Комбинированные системы

При анализе комбинированной системы нужно разбить систему на простые подсистемы – группы элементов, методика расчёта надёжности которых известна. Затем эти подсистемы в структурной схеме надёжности заменяются элементами с вероятностями безотказной работы, равными вычисленным вероятностям безотказной работы этих подсистем. Такие действия следует выполнять до тех пор, пока оставшиеся элементы не образуют структуру, методика расчёта надёжности которой также известна.

#### АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ:

Рассмотрим комбинированную систему, представленную на рисунке 2.2.

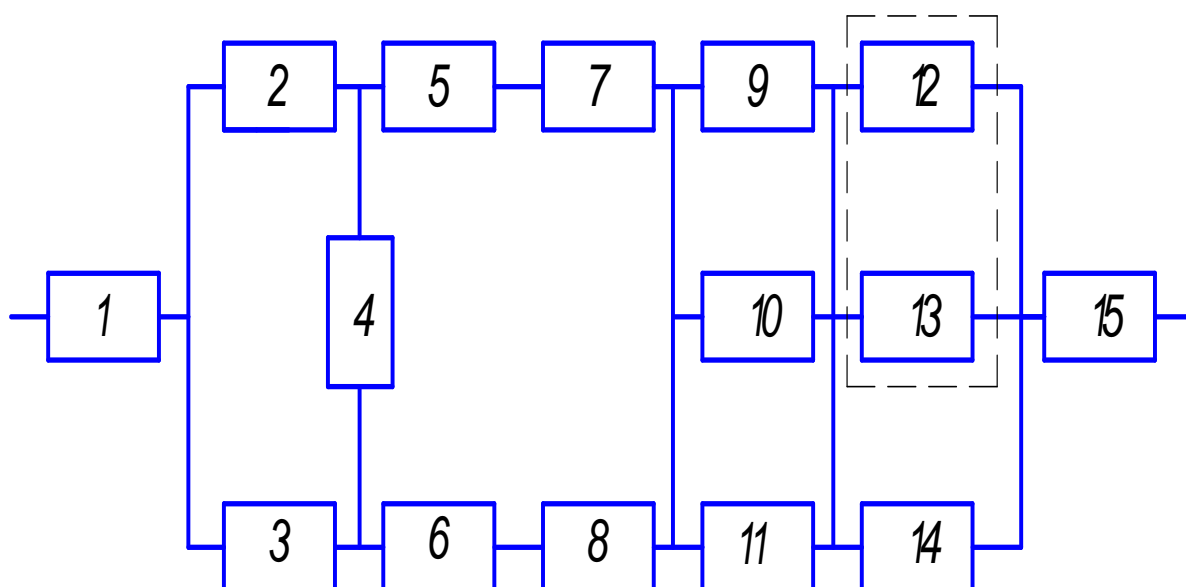


Рисунок 2.2 - Исходная система

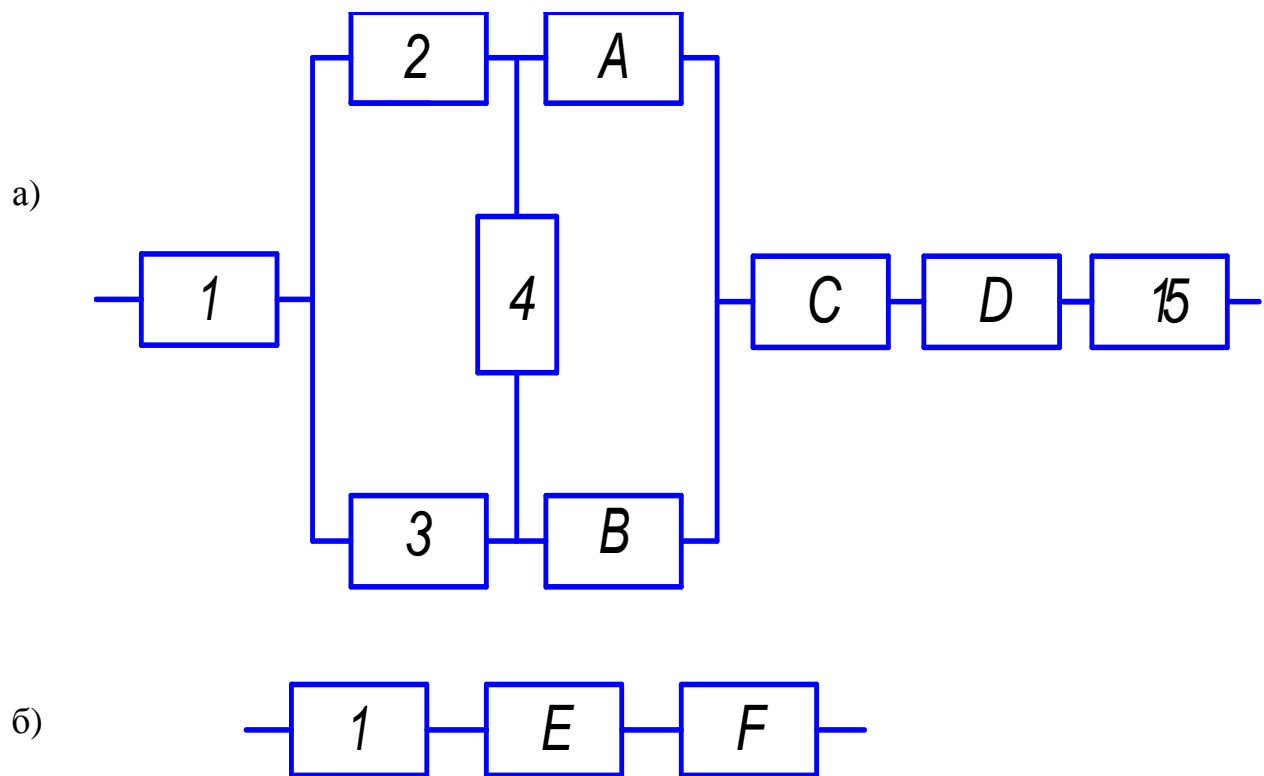


Рисунок 2.3 - Преобразованная система

Здесь элементы 5 и 7, 6 и 8 попарно образуют друг с другом последовательные соединения. Замена элементов 5 и 7, 6 и 8 соответственно элементами  $A$ ,  $B$  позволяет выполнить расчёт надёжности по формулам последовательного соединения. Элементы 9, 10, 11 образуют параллельное соединение, а элементы 12, 13, 14 – систему «2 из 3». При подобной замене соответствующие элементы обозначены  $C$  и  $D$ . В результате преобразованная схема принимает вид, показанный на рисунке 2.3,а. В ней, в свою очередь, элементы 2, 3, 4,  $A$ ,  $B$  образуют мостиковую схему, которая заменяется элементом  $E$ . Элементы  $C$ ,  $D$  и 15 образуют друг с другом последовательное соединение, обозначенное как элемент  $F$ . Схема, полученная после таких преобразований (рисунок 2.3,б), показывает соединение элементов 1,  $E$ ,  $F$ , для которых справедливы формулы последовательного соединения.

ЗАДАНИЕ: определить вероятность безотказной работы системы  $P_{сист}$ .

ДАНО: вероятности безотказной работы соответствующих элементов равны:

Элемент $i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$P_i$	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,8	0,7	0,7	0,6	0,4	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8

РЕШЕНИЕ: решение задачи состоит в последовательном расчёте вероятностей безотказной работы всех элементов преобразованной комбинированной системы по расчётным формулам соответствующих соединений.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ:

1. Рассчитываются вероятности безотказной работы элементов  $A$  и  $B$  по формуле *последовательного соединения элементов*:  $P_A = P_5 \cdot P_7 = 0,6 \cdot 0,7 = 0,42$ ; Вероятность для элемента  $B$  определяется аналогично.

2. Рассчитывается вероятность безотказной работы элемента  $C$  по формулам *параллельного соединения*:

$$P_C = 1 - Q_C, \quad Q_{\bar{n}} = Q_9 \cdot Q_{10} \cdot Q_{11} = (1 - P_9) \cdot (1 - P_{10}) \cdot (1 - P_{11}).$$

3. Для системы  $D$  – «2 из 3» вероятность безотказной работы рассчитывается по следующей формуле:

$$P_D = C_3^3 \cdot p^3 + C_3^2 \cdot p^2 \cdot (1 - p) = p^3 + 3p^2(1 - p) = 3p^2 - 2p^3,$$

где  $C_n^k$  – биномиальный коэффициент («число сочетаний по  $k$  из  $n$ »):

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

4. Рассчитывается элемент  $E$  по формуле, аналогичной (2.1).

5. Рассчитывается элемент  $F$  по формуле для последовательного соединения.

6. Вероятность безотказной работы всей системы  $P_{сист}$  (рисунок 2.3,б) определяется также по формуле для последовательного соединения.

7. На основании полученных расчётных данных сделать вывод о надёжности всей комбинированной системы и отдельных её подсистем.

## 2.2 Анализ и расчёт надёжности объекта методом «дерева неисправностей»

### 2.2.1 Метод «дерева неисправностей»

Метод «дерева неисправностей» заключается в построении и анализе модели надёжности, представляющей собой логико-вероятностную модель связей отказов объекта с отказами его элементов и другими событиями.

Последовательность построения «дерева неисправностей» состоит в осуществлении анализа сверху вниз. Для наглядного представления причинной взаимосвязи используются два типа элементарных блоков: логические символы и символы событий. Логические символы связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями.

Рассмотрим пример анализа надёжности металлорежущего станка. Устройство и принцип работы всех типов металлообрабатывающих станков (токарных, фрезерных, строгальных, шлифовальных и др.) практически не имеют различий. Но станки различаются по назначению, конструкциям, размерам и т. д.

Для получения более полного представления о системе «станок» необходимо пользоваться его описанием.

В состав технической системы «станок» входят подсистемы:

- электрическая,
- гидравлическая,
- механическая.

### 2.2.2 Анализ и расчёт надёжности системы «станок»

Возможные причины отказа станка: *функциональный отказ* как следствие внезапного отказа блоков, узлов, деталей или *параметрический отказ*, который произойдет, когда будет исчерпана технологическая надёжность.

Система рассматривается в период нормальной эксплуатации, поэтому принимается, что параметрические отказы не происходят.

## АНАЛИЗ СИСТЕМЫ «СТАНОК»:

Функциональный отказ, приводящий к остановке станка, наступит в результате реализации приведенных прогнозируемых причинно-следственных цепей опасностей:

- отказ электродвигателя;
- отказ концевого выключателя;
- короткое замыкание кабеля на землю;
- короткое замыкание электрооборудования на корпус;
- отказ предохранителя;
- отказ насоса;
- отказ дросселя;
- отказ обратного клапана;
- отказ предохранительного клапана;
- потеря герметичности в маслопроводе;
- отказ муфты главного привода;
- отказ муфты первого вала коробки скоростей;
- отказ зубчатого колеса коробки скоростей;
- отказ ограничителя передвижных зубчатых колес коробки скоростей;
- отказ зубчатого колеса коробки подач;
- отказ муфты сцепления зубчатых колес коробки подач.

На рисунке представлено построенное на основе рассмотренных причинно-следственных цепей «дерево неисправностей» металлорежущего станка.

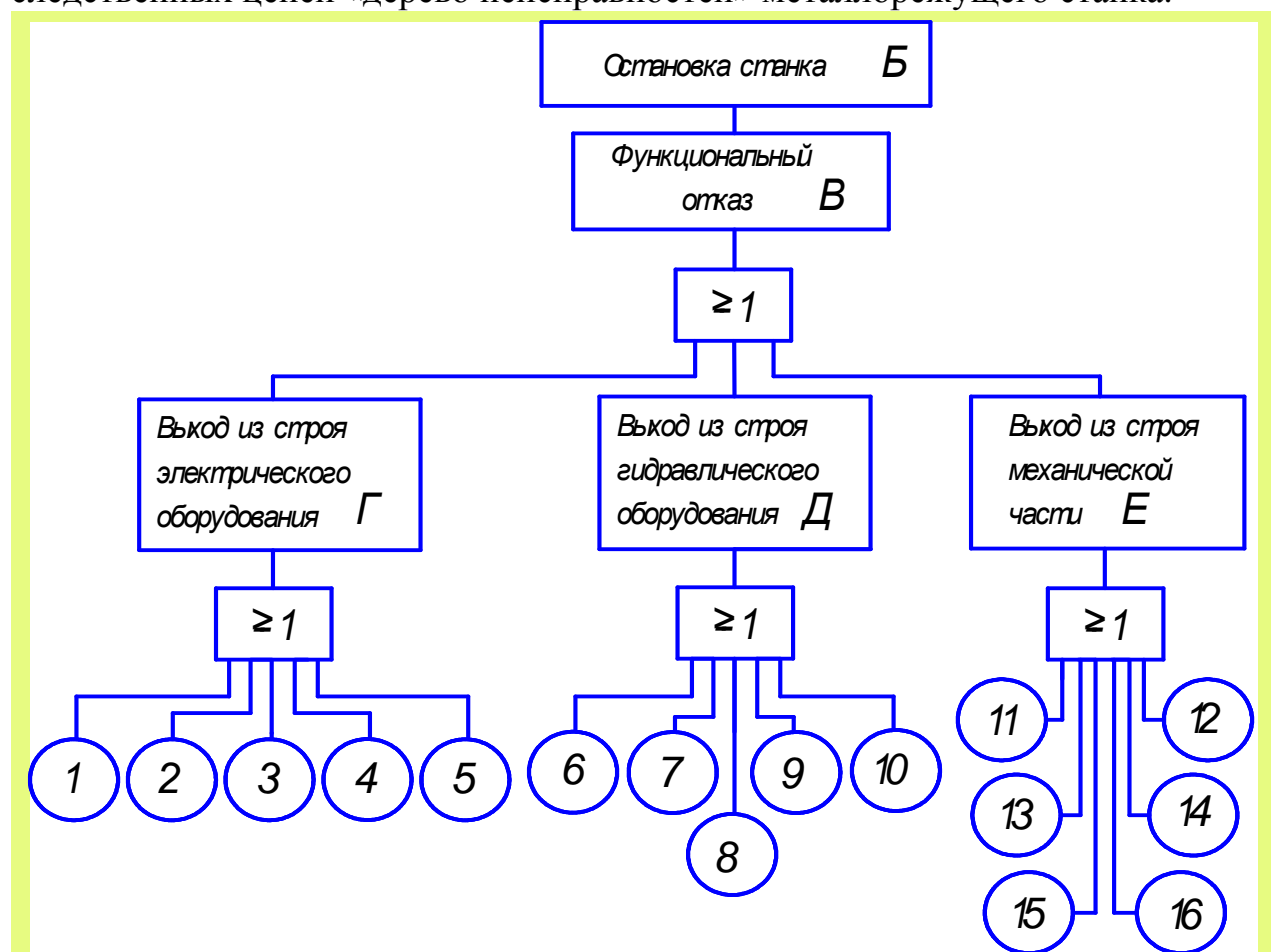




Рисунок - «Дерево неисправностей» металлорежущего станка:

1 – отказ электродвигателя; 2 - отказ концевого выключателя; 3 – короткое замыкание кабеля на землю; 4 – короткое замыкание электрооборудования на корпус; 5 – отказ предохранителя; 6 – отказ насоса; 7 – отказ дросселя; 8 – отказ обратного клапана; 9 – отказ предохранительного клапана; 10 – потеря герметичности в маслопроводе; 11 – отказ муфты главного привода; 12 – отказ муфты первого вала коробки скоростей; 13 – отказ зубчатого колеса коробки скоростей; 14 – отказ ограничителя передвижных зубчатых колес коробки скоростей; 15 – отказ зубчатого колеса коробки подач; 16 – отказ муфты сцепления зубчатых колес коробки подач.

ЗАДАНИЕ: рассчитать вероятность остановки станка *Б*.

ДАНО: используем статистические данные по интенсивности отказов. Сведём эти данные в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Интенсивность отказов элементов металлорежущего станка

Позиция	Наименование отказа	Интенсивность отказов $\lambda, ч^{-1}$
1	Отказ электродвигателя	$3,1 \cdot 10^{-4}$
2	Отказ концевого выключателя	$3 \cdot 10^{-4}$
3	Короткое замыкание кабеля на землю	$3 \cdot 10^{-7}$
4	Короткое замыкание электрооборудования на корпус	$1,1 \cdot 10^{-5}$
5	Отказ предохранителя	$3 \cdot 10^{-7}$
6	Отказ насоса	$1,12 \cdot 10^{-6}$
7	Отказ обратного клапана	$1 \cdot 10^{-4}$
8	Отказ дросселя	$1 \cdot 10^{-8}$
9	Отказ предохранительного клапана	$1 \cdot 10^{-5}$
10	Потеря герметичности в маслопроводе	$3 \cdot 10^{-6}$
11	Отказ муфты главного привода	$4 \cdot 10^{-8}$
12	Отказ муфты первого вала коробки скоростей	$2 \cdot 10^{-8}$
13	Отказ зубчатого колеса коробки скоростей	$2 \cdot 10^{-9}$
14	Отказ ограничителя передвижных зубчатых колес коробки скоростей	$1,65 \cdot 10^{-7}$
15	Отказ зубчатого колеса коробки подач	$2 \cdot 10^{-9}$
16	Отказ муфты сцепления зубчатых колес коробки подач	$4 \cdot 10^{-8}$

РЕШЕНИЕ: используем экспоненциальный закон распределения вероятностей. Тогда вероятности безотказной работы элементов определяются по формуле:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t} = \exp(-\lambda_i t).$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ:

1. Результаты расчёта представляются в виде таблицы 2.2:

Таблица 2.2 - Расчетные данные по вероятности отказов станка

№ п/п	Индекс	Наименование отказа	Вероятность отказа
1	<i>Б</i>	Остановка станка	
2	<i>В</i>	Функциональный отказ	
3	<i>Г</i>	Выход из строя электрооборудования	
4	<i>Д</i>	Выход из строя гидрооборудования	
5	<i>Е</i>	Выход из строя механической части	

2. Производится расчёт вероятностей отказа подсистем «станка» *Г*, *Д*, *Е*, *В*. Для расчёта используются формула (1.1). Например, вероятность отказа подсистемы *Г*:

$$Q_G = 1 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5$$

Аналогично рассчитываются вероятности отказов подсистем *Д* и *Е*.

3. Вероятность функционального отказа *В*:

$$Q_B = 1 - P_G \cdot P_D \cdot P_E,$$

где  $P_G = 1 - Q_G$ ,  $P_D = 1 - Q_D$ ,  $P_E = 1 - Q_E$ .

Вероятность остановки станка *Б*:

$$Q_B = Q_B.$$

Для анализа надёжности других станков можно пользоваться приведенным алгоритмом.

## 3 САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

### 3.1 Цель и задачи выполнения самостоятельной работы

Целью самостоятельной работы, выполняемой по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск», является освоение современных представлений в области обеспечения надёжности технических систем на основе сбора, обработки, анализа и систематизация научно-технической информации по ряду разделов теоретической части изучаемой дисциплины.

Для достижения указанной цели в ходе выполнения самостоятельной работы студент должен приобрести навыки практического решения следующих задач:

- анализ состояния научно-технической проблемы, формулирование технического задания, постановка цели и задач исследования надёжности технических систем на основе подбора и изучения литературных источников;
- анализ, систематизация и обобщение научно-технической информации по методам обеспечения надёжности;
- библиографический поиск с использованием современных информационных технологий;
- оформление результатов работы в виде реферата;
- выступление с докладом по работе на практическом занятии по дисциплине.

### 3.2 Перечень тем для самостоятельной работы

1. Влияние внешних факторов на формирование отказов технических систем.
2. Организация и проведение экспертизы технических систем.
3. Анализ опасности и работоспособности системы по методу ключевых слов и с помощью проверочных листов.
4. Правовые аспекты анализа риска и управления промышленной безопасностью.
5. Законы распределения вероятностей случайных событий и величин (нормальный и экспоненциальный законы).

6. Исследование надёжности технических систем с позиции их безопасности.
7. Инженерные методы исследования безопасности технических систем: логический анализ, контрольные карты процессов, кластерный анализ.
8. Анализ ошибок человека как звена сложной технической системы.
9. Структура и принципы функционирования автоматических систем защиты.
10. Диагностика нарушений и аварийных ситуаций в технических системах.

### 3.3 Порядок выполнения самостоятельной работы

Рекомендуется следующий порядок выполнения самостоятельной работы:

1. Изучить темы, отведённые для самостоятельной работы (см. пр. 3.2).
2. Выбрать (получить у руководителя) тему для её углубленного исследования с последующим оформлением реферата.
3. Оформить реферат на бумажном носителе и предоставить его для проверки руководителю.
4. Подготовить доклад по теме работы. Продолжительность доклада 5 мин. Для иллюстрации подготовить краткую видеопрезентацию, раскрывающую основное содержание работы.

### 3.4 Объём самостоятельной работы и структура реферата

Реферат должен содержать до 20 страниц и включать следующие разделы:

- титульный лист, образец титульного листа дан в приложении;
- содержание;
- введение: актуальность темы, практическая значимость, цель, краткое содержание реферата по разделам;
- текст основной части реферата; анализ проблемы по литературным источникам (в том числе Интернет-ресурсам);
- заключение: основные результаты и выводы по исследованной теме;
- список использованной литературы и Интернет-ресурсов.

### 3.5 Оформление самостоятельной работы

Реферат оформляется с соблюдением всех требований к оформлению текстовых документов. Рисунки располагаются в тексте реферата непосредственно после ссылки на них.

Основные правила оформления:

- поля: слева – 25 мм, справа – 10 мм, сверху и снизу – 20 мм;
- шрифт Times New Roman, кегль 14, центрирование по ширине;
- красная строка – 1,25 см;
- полужирный шрифт допускается только в заглавиях разделов;
- при необходимости выделения в тексте отдельных положений, формулировок применять *курсивный шрифт*.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Корчагин А.Б., Сердюк В.С., Бокарев А.И. Надёжность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие в 2-х частях. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. - Ч. 1 : Основы теории. – 228 с. Ч. 2: Практикум. – 140 с.
- 2 Безопасность жизнедеятельности: Учебник для вузов / Под ред. С.В. Белова. – 8-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2008. – 616 с.
- 3 Малкин В.С. Надёжность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие для вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 432, [1] с.
- 4 Половко А. М. Основы теории надежности: Учебное пособие для вузов / А. М. Половко , С. В. Гуров. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб. : БХВ-Петербург, 2006. - 702[2] с.
- 5 Безопасность жизнедеятельности. Безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: Учебное пособие для вузов / В. А. Акимов [и др.]. - М.: Высшая школа, 2006. - 591, [1] с.
- 6 Безопасность жизнедеятельности : Учебник для вузов / Л. А. Михайлов [и др.] ; ред. : Л. А. Михайлов. - СПб. : Питер, 2007. - 301[3] с. : ил., табл. - (Учебник для вузов) (300 лучших учебников для высшей школы). - Библиогр.: с. 298-301с.
- 7 Надёжность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие для вузов / В.А. Акимов [и др.]. Под общей редакцией М.И. Фалеева. – М.: Деловой экспресс, 2002. – 368 с.
- 8 Малафеев С.И., Копейкин А.И. Надёжность технических систем: Учебное пособие. – М.: Изд-во «Лань», 2012. – 320 с.

[// www.e.lanbook.com/books/element.php/](http://www.e.lanbook.com/books/element.php/)

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»  
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)

РЕФЕРАТ

на тему:

по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск»

Выполнил: студент группы \_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Проверил: преподаватель \_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Томск - 2014 г.