

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра управления в технических системах



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

*Е.И. Луковникова* Е.И. Луковникова

«29» мая 2020 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

**Б1.В.ДВ.07.02**

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**27.03.04 Управление в технических системах**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ**

**Управление и информатика в технических системах**

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 27.03.04 Управление в технических системах от 20.10.2015 г № 1171 и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» от 03.02.2020 г № 46 для очной формы обучения, заочно - ускоренной формы обучения для набора 2020 года

<b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ</b>	<b>4</b>
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....	4
<b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>5</b>
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....	6
4.3 Лабораторные работы.....	35
4.4 Практические занятия....	35
4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	35
<b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>36</b>
<b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>	<b>37</b>
<b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>37</b>
<b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>37</b>
<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>38</b>
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ практических работ .....	38
<b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>46</b>
<b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>47</b>
<b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>	<b>48</b>
<b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>	<b>52</b>
<b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>	<b>53</b>

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к экспериментально-исследовательскому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель дисциплины

Целью дисциплины является овладение знаниями основных вопросов диагностики и теории надежности в современной технике, методами расчета надежности на стадиях проектирования, производства и эксплуатации объектов на примерах систем управления.

## Задачи дисциплины

- Освоение диагностики систем управления
- Изучение методов повышения и расчета параметрической и структурной надежности систем управления.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ПК-1	Способность выполнять эксперименты на действующих объектах по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением современных информационных	<b>Знать:</b> - основные принципы и методы построения к исследования математических моделей систем управления и преобразования для целей управления; <b>Уметь:</b> - использовать инструментальные программные средства в процессе разработки и эксплуатации технических систем; <b>Владеть:</b> - навыками работы с современными аппаратными и программными средствами исследования и проектирования технических систем;
ПК-2	Способность проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления	<b>Знать:</b> - Базовое устройство персонального компьютера. <b>Уметь:</b> - Использовать персональный компьютер для самостоятельной работы. <b>Владеть:</b> - Достаточным уровнем использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.ДВ.07.2 Диагностика и надежность систем управления относится к дисциплинам по выбору.

Дисциплина Идентификация и диагностика технических систем базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин Б1.Б.16 Теория автоматического управления,

Б1.В.ОД.9 Цифровые системы управления, Б1.В.ОД.14 Автоматизированные информационно-управляющие системы.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Идентификация и диагностика технических систем представляет основу для изучения дисциплин: Б2.П.3 производственная (преддипломная) практика и подготовки к государственной итоговой аттестации.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

### 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Очная</b>	4	8	108	48	24	12	12	60	-	Зачет
<b>Заочная</b>	4	-	108	14	6	4	4	94	-	Зачет
<b>Заочная (ускоренное обучение)</b>	2	-	108	10	6	2	2	98	-	Зачет
<b>Очно-заочная</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

#### 3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			8
1	2	3	4
<b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b>	48	11	48
Лекции (Лк)	24	3	24
Лабораторные работы (ЛР)	12	4	12
Практические работы (ПР)	12	4	12
Индивидуальные (групповые) консультации	+	-	+
<b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>	60	-	60
Подготовка к лабораторным работам	20	-	20
Подготовка к практическим работам	20	-	20

Подготовка к зачету в течение семестра	20	-	20
<b>III. Промежуточная аттестация зачет</b>	+	-	+
Общая трудоемкость дисциплины ..... час.	108	-	108
зач. ед.	3	-	3

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические работы	
1	2	3	4	5	6	7
<b>1.</b>	<b>Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности.</b>	<b>30</b>	<b>6</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>24</b>
1.1	Основные понятия надежности.	15	3	-	-	12
1.2.	Количественные показатели надежности.	15	3	-	-	12
<b>2.</b>	<b>Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием.</b>	<b>39</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>18</b>
2.1.	Математические модели теории надежности	13	3	2	2	6
2.2	Нормальный закон распределения наработки до отказа.	13	3	2	2	6
2.3	Системы с резервированием.	13	3	2	2	6
<b>3.</b>	<b>Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказах.</b>	<b>39</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>18</b>
3.1	Надежность основной системы.	13	3	2	2	6
3.2	Надежность восстанавливаемых объектов и систем	13	3	2	2	6
3.3	Надежность объектов при постепенных отказах.	13	3	2	2	6
	<b>ИТОГО</b>	<b>108</b>	<b>24</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>60</b>

- для заочной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические работы	
1	2	3	4	5	6	7
<b>1.</b>	<b>Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности.</b>	<b>32</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>30</b>
1.1	Основные понятия надежности.	16	1	-	-	15
1.2.	Количественные показатели	16	1	-	-	15

	надежности.					
<b>2.</b>	<b>Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием.</b>	<b>36</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>30</b>
2.1.	Математические модели теории надежности	15	1	2	2	10
2.2	Нормальный закон распределения наработки до отказа.	11	1	-	-	10
2.3	Системы с резервированием.	10	-	-	-	10
<b>3.</b>	<b>Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказах.</b>	<b>36</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>30</b>
3.1	Надежность основной системы.	15	1	2	2	10
3.2	Надежность восстанавливаемых объектов и систем	11	1	-	-	10
3.3	Надежность объектов при постепенных отказах.	10	-	-	-	10
	<b>ИТОГО</b>	<b>104</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>90</b>

- для заочной формы обучения (ускоренное обучение):

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические работы	
1	2	3	4	5	6	7
<b>1.</b>	<b>Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности.</b>	<b>34</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>32</b>
1.1	Основные понятия надежности.	17	1	-	-	16
1.2.	Количественные показатели надежности.	17	1	-	-	16
<b>2.</b>	<b>Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием.</b>	<b>34</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>32</b>
2.1.	Математические модели теории надежности	13	1	2	-	10
2.2	Нормальный закон распределения наработки до отказа.	12	1	-	-	11
2.3	Системы с резервированием.	11	-	-	-	11
<b>3.</b>	<b>Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказах.</b>	<b>34</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>30</b>
3.1	Надежность основной системы.	13	1	-	2	10
3.2	Надежность восстанавливаемых объектов и систем	11	1	-	-	10
3.3	Надежность объектов при постепенных отказах.	10	-	-	-	10
	<b>ИТОГО</b>	<b>104</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>94</b>

## 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

### 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ.

#### 1.1 Основные понятия

**Надежность** – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени и в заданных пределах значения установленных эксплуатационных показателей.

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

Объектами могут быть различные системы и их элементы.

**Элемент** – простейшая составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей.

**Система** – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Например, станок, при установлении его собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, деталей и т.п., а при изучении надежности технологической линии – как элемент.

Надежность объекта характеризуется следующими основными *состояниями* и *событиями*.

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

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

Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач.

Понятие *исправности* шире, чем понятие *работоспособности*. Работоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Таким образом, если объект неработоспособен, то это свидетельствует о его неисправности. С другой стороны, если объект неисправен, то это не означает, что он неработоспособен.

**Предельное состояние** – состояние объекта, при котором его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно.

Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

- при неустранимом нарушении безопасности;
- при неустранимом отклонении величин заданных параметров;
- при недопустимом увеличении эксплуатационных расходов.

Для некоторых объектов предельное состояние является последним в его функционировании, т.е. объект снимается с эксплуатации, для других – определенной фазой в эксплуатационном графике, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ.

В связи с этим, объекты могут быть:

- **невосстанавливаемые**, для которых работоспособность в случае возникновения отказа, не подлежит восстановлению;
- **восстанавливаемые**, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путем замены.

К числу невосстанавливаемых объектов можно отнести, например: подшипники качения, полупроводниковые изделия, зубчатые колеса и т.п. Объекты, состоящие из многих элементов, например, станок, автомобиль, электронная аппаратура, являются восстанавливаемыми, поскольку их отказы связаны с повреждениями одного или немногих элементов, которые могут быть заменены.

В ряде случаев один и тот же объект в зависимости от особенностей, этапов эксплуатации или назначения может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

**Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Критерий отказа – отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа.

#### Классификация и характеристики отказов

По *типу* отказы подразделяются на:

- **отказы функционирования** (выполнение основных функций объектом прекращается, например, поломка зубьев шестерни);
- **отказы параметрические** (некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах, например, потеря точности станка).

По своей *природе* отказы могут быть:

- **случайные**, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п.;

- **систематические**, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п.

Основные признаки классификации отказов:

- характер возникновения;
- причина возникновения;
- характер устранения;
- последствия отказов;
- дальнейшее использование объекта;
- легкость обнаружения;
- время возникновения.

### Составляющие надежности

Надежность является *комплексным* свойством, включающим в себя в зависимости от назначения объекта или условий его эксплуатации ряд *простых* свойств:

- **безотказность**;
- **долговечность**;
- **ремонтпригодность**;
- **сохраняемость**.

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

**Наработка** – продолжительность или объем работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения, километры пробега и т. п.).

**Долговечность** – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

**Ремонтпригодность** – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособности путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

**Сохраняемость** – свойство объекта непрерывно сохранять требуемые эксплуатационные показатели в течение (и после) срока хранения и транспортирования.

В зависимости от объекта надежность может определяться всеми перечисленными свойствами или частью их. Например, надежность колеса зубчатой передачи, подшипников определяется их долговечностью, а станка – долговечностью, безотказностью и ремонтпригодностью.

### Основные показатели надежности

**Показатель надежности** количественно характеризует, в какой степени данному объекту присущи определенные свойства, обуславливающие надежность. Одни показатели надежности (например, технический ресурс, срок службы) могут иметь размерность, ряд других (например, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности) являются безразмерными.

Рассмотрим показатели составляющей надежности - долговечность.

**Технический ресурс** – наработка объекта от начала его эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния. Строго говоря, технический ресурс может быть регламентирован следующим образом: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т. п. Если регламентация отсутствует, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех видов ремонтов.

Для невозстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

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

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации (в том числе, хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния.

На рис. приведена графическая интерпретация перечисленных показателей, при этом:

$t_0 = 0$  – начало эксплуатации;

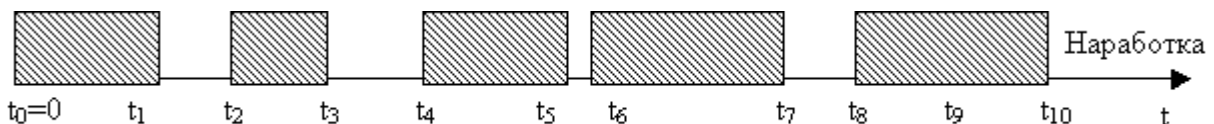
$t_1, t_5$  – моменты отключения по технологическим причинам;

$t_2, t_4, t_6, t_8$  – моменты включения объекта;

$t_3, t_7$  – моменты вывода объекта в ремонт, соответственно, средний и капитальный;

$t_9$  – момент прекращения эксплуатации;

$t_{10}$  – момент отказа объекта.



Технический ресурс (наработка до отказа)

$$TP = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$



Назначенный ресурс

$$TH = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8).$$

$$\text{Срок службы объекта} \quad TC = t_{10}.$$

Для большинства объектов электромеханики в качестве критерия долговечности чаще всего используется технический ресурс.

## 1.2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ

### Общие понятия

Наиболее важные показатели надежности невосстанавливаемых объектов – *показатели безотказности*, к которым относятся:

- *вероятность безотказной работы;*
- *плотность распределения отказов;*
- *интенсивность отказов;*
- *средняя наработка до отказа.*

Показатели надежности представляются в двух формах (определениях):

- статистическая (выборочные оценки);

- вероятностная.

*Статистические определения (выборочные оценки)* показателей получаются по результатам испытаний на надежность.

Допустим, что в ходе испытаний какого-то числа однотипных объектов получено конечное число интересующего нас параметра – наработки до отказа. Полученные числа представляют собой выборку некоего объема из общей «генеральной совокупности», имеющей неограниченный объем данных о наработке до отказа объекта.

Количественные показатели, определенные для «генеральной совокупности», являются *истинными (вероятностными) показателями*, поскольку объективно характеризуют случайную величину – наработку до отказа.

Показатели, определенные для выборки, и, позволяющие сделать какие-то выводы о случайной величине, являются *выборочными (статистическими) оценками*. Очевидно, что при достаточно большом числе испытаний (большой выборке) оценки *приближаются* к вероятностным показателям.

Вероятностная форма представления показателей удобна при аналитических расчетах, а статистическая – при экспериментальном исследовании надежности.

Для обозначения статистических оценок будем использовать знак  $\hat{\phantom{x}}$  сверху.

Примем следующую *схему испытаний* для оценки надежности.

Пусть на испытания поставлено  $N$  одинаковых серийных объектов. Условия испытаний идентичны, а испытания каждого из объектов проводятся до его отказа.

Введем следующие обозначения:

$T = \{0, t_1, \dots, t_N\} = \{t\}$  – случайная величина наработки объекта до отказа;

$N(t)$  – число объектов, работоспособных к моменту наработки  $t$ ;

$n(t)$  – число объектов, отказавших к моменту наработки  $t$ ;

$\Delta n(t, t + \Delta t)$  – число объектов, отказавших в интервале наработки  $[t, t + \Delta t]$ ;

$\Delta t$  – длительность интервала наработки.

Поскольку в дальнейшем определение выборочных оценок базируется на математических моделях теории вероятностей и математической статистики, то ниже приводятся основные (минимально необходимые) сведения из теории вероятностей.

Более подробный материал из теории вероятностей читатель может получить в Приложении: «Основные понятия и краткие сведения из теории вероятностей».

### Основные сведения о математических моделях расчета в теории вероятностей

*Теория вероятностей* – математическая наука, изучающая закономерности в случайных явлениях.

#### Основные понятия теории множеств

Одним из основных понятий является – случайное событие.

**Событием** называется всякий факт (исход), который в результате опыта (испытания) может произойти или не произойти.

Каждому из таких событий можно поставить в соответствие определенное число, называемое его **вероятностью** и являющееся мерой возможного совершения этого события.

Теория вероятностей основывается на аксиоматическом подходе и опирается на понятия теории множеств.

**Множество** – это любая совокупность объектов произвольной природы, каждый из которых называется элементом множества.

Предположим, что производится некоторый опыт (испытание), результат которого заранее неизвестен. Тогда **множество**  $\Omega$  всех возможных исходов опыта представляет пространство элементарных событий, а каждый его элемент  $\omega \in \Omega$  (отдельный исход опыта) является **элементарным событием**. Любой набор элементарных событий (любое их сочетание) считается **подмножеством** (частью) множества  $\Omega$  и является **случайным событием**, т. е. любое событие  $A$  – это подмножество множества  $\Omega$ :  $A \subset \Omega$ .

В общем случае, если множество  $\Omega$  содержит  $n$  элементов, то в нем можно выделить  $2^n$  подмножеств (событий).

Введем ряд определений.

**Совместные (несовместные) события** – такие события, появление одного из которых не исключает (исключает) возможности появления другого.

**Зависимые (независимые) события** – такие события, появление одного из которых влияет (не влияет) на появление другого события.

**Противоположное событие** относительно некоторого выбранного события  $A$  – событие, состоящее в не появлении этого выбранного события (обозначается  $\bar{A}$ ).

**Полная группа событий** – такая совокупность событий, при которой в результате опыта должно произойти хотя бы одно из событий этой совокупности.

### Аксиомы теории вероятностей

Вероятность события  $A$  обозначается  $P(A)$  или  $P\{A\}$ . Вероятность выбирают так, чтобы она удовлетворяла следующим условиям или аксиомам:

$$P(\Omega) = 1; P(\emptyset) = 0. \quad (1)$$

$$P(\emptyset) \leq P(A) \leq P(\Omega) \quad (2)$$

Если  $A_i$  и  $A_j$  несовместные события, т. е.  $A_i \cap A_j = \emptyset$ , то

$$P(A_i \cup A_j) = P(A_i) + P(A_j), \quad (3)$$

где  $\cup$ - знак логического сложения событий,  $\emptyset$  – пустое множество (отсутствие событий).

Аксиома (3) обобщается на любое число несовместных событий  $\{A_i\}_{i=1}^n$ :

$$P\left\{\bigcup_{i=1}^n A_i\right\} = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (4)$$

**Частотное определение вероятности любого события  $A$ :**

$$P(A) = \frac{m_A}{n}, \quad (5)$$

представляет отношение числа случаев ( $m_A$ ), благоприятных появлению события  $A$ , к общему числу случаев (возможному числу исходов опыта)  $n$ .

При неограниченном возрастании числа  $n$  наблюдается статистическое упорядочение, когда частота события  $A$  (выборочная оценка) все меньше изменяется и приближается к постоянному значению - вероятности события  $A$ .

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ. НОРМАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА. СИСТЕМЫ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

### Общие понятия о моделях надежности

Для решения задач по оценке надежности и прогнозированию работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель, которая представлена аналитическими выражениями одного из показателей  $P(t)$  или  $f(t)$  или  $\lambda(t)$ . Основной путь для получения модели состоит в проведении испытаний, вычислении статистических оценок и их аппроксимации аналитическими функциями.

В последующих лекциях будут рассмотрены модели, используемые в теории надежности.

Выясним, как изменяется безотказность объектов при их эксплуатации, что позволит классифицировать модели и определить возможности их применения.

Опыт эксплуатации показывает, что изменение ИО  $\lambda(t)$  подавляющего большинства объектов описывается  $U$  – образной кривой (рис. 1).

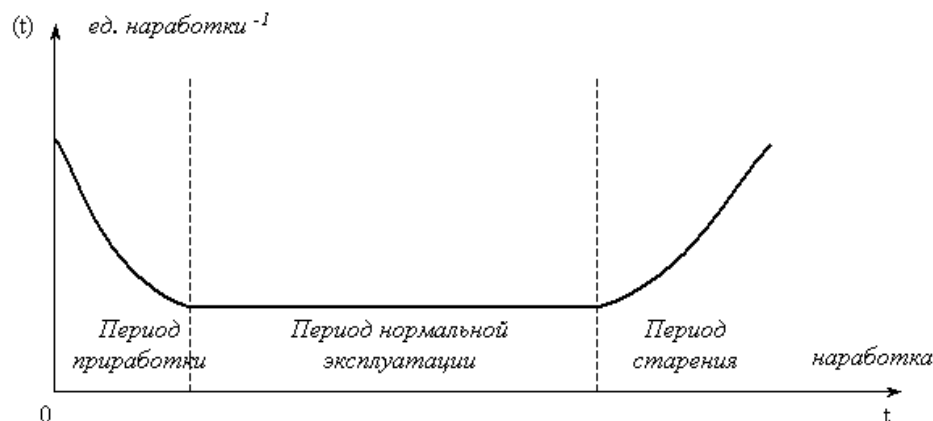


Рис. 1

Кривую можно условно разделить на три характерных участка: первый – период приработки,

второй – период нормальной эксплуатации,  
 третий – период старения объекта.

*Период приработки* объекта имеет повышенную ИО, вызванную приработочными отказами, обусловленными дефектами производства, монтажа, наладки. Иногда с окончанием этого периода связывают гарантийное обслуживание объекта, когда устранение отказов производится изготовителем.

В *период нормальной эксплуатации* ИО уменьшается и практически остается постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего из-за несоблюдения условий эксплуатации, случайных изменений нагрузки, неблагоприятных внешних факторов и т. п. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации объекта.

Возрастание ИО относится к *периоду старения* объекта и вызвано увеличением числа отказов от износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией.

Вид аналитической функции, описывающей изменение показателей надежности  $P(t)$ ,  $f(t)$  или  $\lambda(t)$ , определяет **закон распределения случайной величины**, который выбирается в зависимости от свойств объекта, его условий работы и характера отказов.

### 2.1. Статистическая обработка результатов испытаний и определение показателей надежности

#### Постановка задачи

По результатам испытаний  $N$  невосстанавливаемых одинаковых объектов получена статистическая выборка – массив наработки (в любых единицах измерения) до отказа каждого из  $N$  испытывавшихся объектов. Выборка характеризует случайную величину наработки до отказа объекта  $T = \{t\}$ .

Необходимо выбрать закон распределения случайной величины  $T$  и проверить правильность выбора по соответствующему критерию.

Подбор закона распределения осуществляется на основе аппроксимации (сглаживания) экспериментальных данных о наработке до отказа, которые должны быть представлены в наиболее компактном графическом виде. Выбор той или иной аппроксимирующей функции носит характер гипотезы, которую выдвигает исследователь. Экспериментальные данные могут с большим или меньшим правдоподобием подтверждать или не подтверждать справедливость той или иной гипотезы. Поэтому исследователь должен получить ответ на вопрос: согласуются ли результаты эксперимента с гипотезой о том, что случайная величина наработки подчинена выбранному им закону распределения? Ответ на этот вопрос дается в результате расчета специальных критериев.

#### Алгоритм обработки результатов и расчета показателей надежности

##### Формирование статистического ряда

При большом числе испытываемых объектов полученный массив наработок  $\{\dots, t_i, \dots\}$  является громоздкой и мало наглядной формой записи случайной величины  $T$ . Поэтому для компактности и наглядности выборка представляется в графическом изображении статистического ряда – гистограмме наработки до отказа. Для этого необходимо:

- установить интервал наработки  $[t_{min}, t_{max}]$  и его длину  $\zeta t = t_{max} - t_{min}$ ,  
 $t_{min} \leq \underset{1}{МИН}\{\dots, t_i, \dots\}, t_{max} \geq \underset{1}{МАКС}\{\dots, t_i, \dots\};$   
 где

- разбить интервал наработки  $[t_{min}, t_{max}]$  на  $k$  интервалов равной ширины  $\Delta t$  – шаг гистограммы

$$\Delta t = \frac{\zeta t}{k}, \Delta t = t_{i+1} - t_i = t_i - t_{i-1}.$$

- подсчитать частоты появления отказов во всех  $k$  интервалах

$$P_i = \frac{\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)}{N} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N},$$

где  $\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)$  – число объектов, отказавших в интервале  $[t_i, t_i + \Delta t]$ .

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^k P_i = 1;$$

- полученный статистический ряд представляется в виде гистограммы, которая строится следующим образом. По оси абсцисс ( $t$ ) откладываются интервалы  $\Delta t$ , на каждом из которых, как на основании, строится прямоугольник, высота

которого пропорциональна (в выбранном масштабе) соответствующей частоте  $P$ . Возможный вид гистограммы приведен на рис. 2.

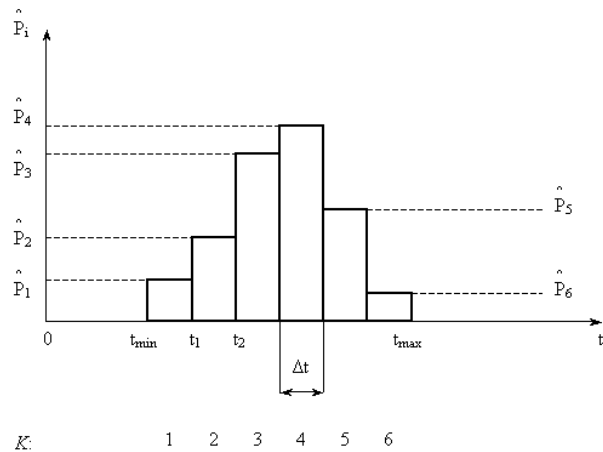


Рис. 2

*Расчет эмпирических функций*

Используя данные сформированного статистического ряда, определяются статистические оценки показателей надежности, т. е. эмпирические функции:

- функция распределения отказов (оценка ВО)

$$\hat{Q}(t_{min}) = \frac{n(t_{min})}{N} = 0$$

$$\hat{Q}(t_1) = \frac{n(t_1)}{N} = \frac{\Delta n(t_{min}, t_1)}{N} = \hat{P}_1;$$

$$\hat{Q}(t_2) = \frac{n(t_2)}{N} = \frac{\Delta n(t_{min}, t_1) + \Delta n(t_1, t_2)}{N} = \hat{P}_1 + \hat{P}_2;$$

$$\hat{Q}(t_{max}) = \frac{n(t_{max})}{N} = \sum_1^k \hat{P}_i = 1;$$

- функция надежности (оценка ВБР)

$$\hat{P}(t_{min}) = 1 - \hat{Q}(t_{min}) = 1;$$

$$\hat{P}(t_{max}) = 1 - \hat{Q}(t_{max}) = 0;$$

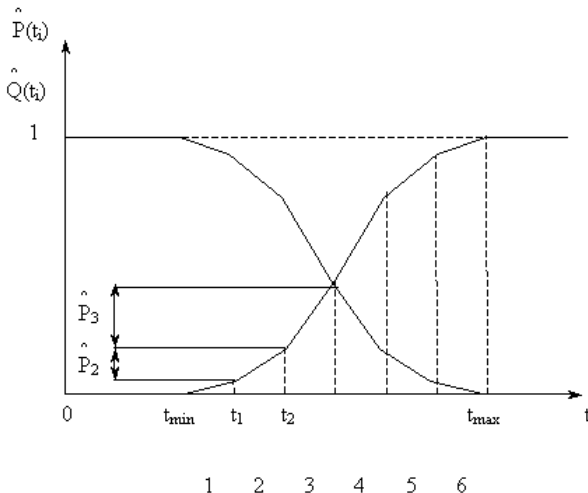


Рис. 3

- плотность распределения отказов (оценка ПРО)

$$\hat{f}(t_j) = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N \cdot \Delta t} = \frac{\hat{P}_i}{\Delta t};$$

- интенсивность отказов (оценка ИО)

$$\hat{\lambda}(t_j) = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N(t_j) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{[N - n(t_j)] \cdot \Delta t}.$$

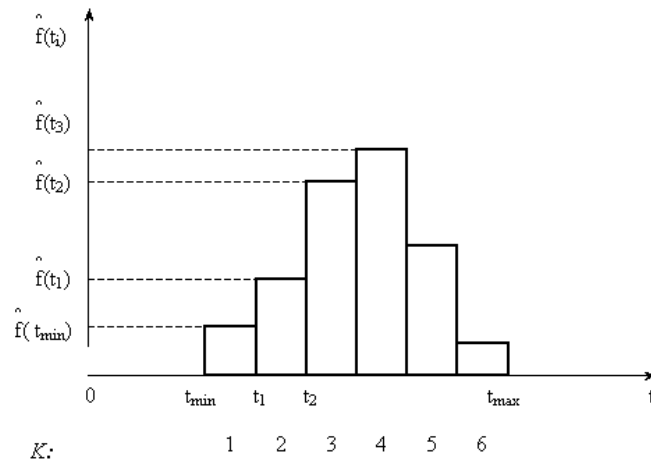


Рис. 4

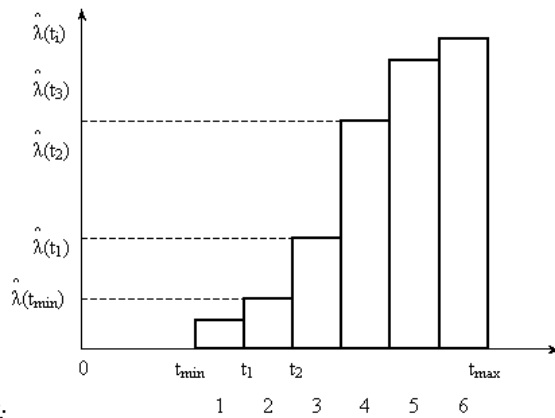


Рис. 5

На рис. 3, 4, 5 приведены соответственно графики статистических оценок  $\hat{Q}(t)$ . Правила построения графиков ясны из приведенных выше расчетных формул. Каждый из графиков имеет свой масштаб.

Для расчета статистических оценок числовых характеристик можно воспользоваться данными сформированного статистического ряда.

Оценки характеристик определяются:

- оценка средней наработки до отказа (статистическое среднее наработки):

$$\hat{T}_0 = \sum_I^K \tilde{t}_i \hat{P}_i;$$

- оценка дисперсии наработки до отказа (эмпирическая дисперсия наработки):

$$\hat{D} = \sum_I^K (\tilde{t}_i - \hat{T}_0)^2 \cdot \hat{P}_i,$$

где  $\tilde{t}_i = t_i + \Delta t/2 = t_{i+1} - \Delta t/2$  - середина i-го интервала наработки, т. е. среднее значение наработки в интервале.

Оценка СКО  $\hat{D} = \hat{S}^2$ .

Целесообразно рассчитать оценки и некоторых вспомогательных характеристик рассеивания случайной величины  $T$ :

- выборочный коэффициент асимметрии наработки до отказа

$$A = \sum_I^K (\tilde{t}_i - \hat{T}_0)^3 \cdot \hat{P}_i / \hat{S}^3,$$

- выборочный эксцесс наработки до отказа

$$E = [\sum_I^K (\tilde{t}_i - \hat{T}_0)^4 \cdot \hat{P}_i / \hat{S}^4] - 3.$$

Эти характеристики используются для выбора аппроксимирующей функции.

Так коэффициент асимметрии является характеристикой «скошенности» распределения, например, если распределение симметрично относительно МО, то  $A = 0$ .

На рис. 6, а распределение  $f_2(t)$  имеет положительную асимметрию  $A > 0$ , а  $f_3(t)$  – отрицательную  $A < 0$ .

Эксцесс характеризует «крутость» (остро- или плосковершинность) распределения.

Для нормального распределения  $E = 0$ .

Кривые  $f(t)$ , более островершинные по сравнению с нормальной, имеют  $E > 0$ , а наоборот – более плосковершинные,  $E < 0$  (рис.6, б).

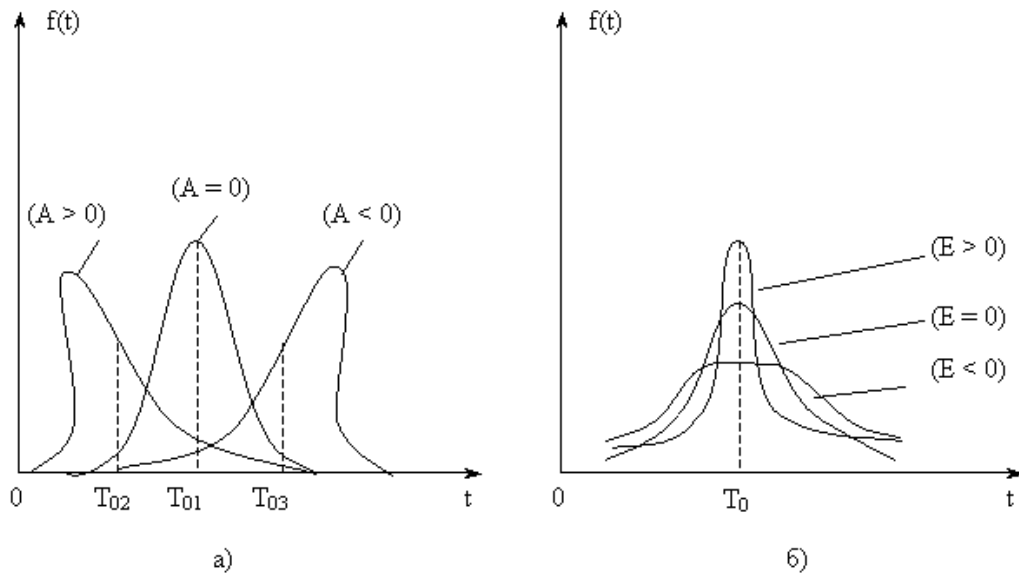


Рис. 6

#### . Выбор закона распределения

Выбор закона распределения состоит в подборе аналитической функции наилучшим образом аппроксимирующей эмпирические функции надежности.

Выбор, в значительной мере, процедура неопределенная и во многом субъективная, при этом многое зависит от априорных знаний об объекте и его свойствах, условиях работы, а также анализа вида графиков  $\hat{P}(t)$ ,  $\hat{f}(t)$ ,  $\hat{\lambda}(t)$ .

Очевидно, что выбор распределения будет зависеть, прежде всего, от вида эмпирической функции ПРО  $\hat{f}(t)$ , а также от вида  $\hat{\lambda}(t)$ . Так коэффициент Итак, выбор закона распределения носит характер принятия той или иной гипотезы.

Предположим, что по тем или иным соображениям, выбран гипотетический закон распределения, заданный теоретической ПРО

$$f(t) = \Psi(t, a, b, c, \dots),$$

где  $a, b, c, \dots$  - неизвестные параметры распределения.

Требуется подобрать эти параметры так, чтобы функция  $f(t)$  наилучшим образом сглаживала ступенчатый график  $\hat{f}(t)$ . При этом используется следующий прием: параметры  $a, b, c, \dots$  выбираются с таким расчетом, чтобы несколько важнейших числовых характеристик теоретического распределения были равны соответствующим статистическим оценкам.

На графике вместе с  $\hat{f}(t)$  строится теоретическая ПРО  $f(t)$ , что позволяет визуально оценить результаты аппроксимации (расхождения между  $\hat{f}(t)$  и  $f(t)$ ). Поскольку эти расхождения неизбежны, то возникает вопрос: объясняются ли они случайными обстоятельствами, связанными с тем, что теоретическое распределение выбрано ошибочным? Ответ на этот вопрос дает расчет критерия согласия.

#### Расчет критерия согласия

Критерий согласия – это критерий проверки гипотезы о том, что случайная величина  $T$ , представленная своей выборкой, имеет распределение предполагаемого типа.

Проверка состоит в следующем. Рассчитывается критерий, как некоторая мера расхождения теоретического и эмпирического распределений, причем эта мера является случайной величиной.

Чем больше мера расхождения, тем хуже согласованность эмпирического распределения с теоретическим, т. е. меньше мала, то гипотезу о выборе закона распределения следует отвергнуть, как мало правдоподобную.

В противном случае – экспериментальные данные не противоречат принятому распределению. Из известных критериев наиболее применяемый критерий согласия  $\chi^2$  (хи-квадрат) Пирсона. Проверка согласованности распределений по критерию  $\chi^2$  производится следующим образом: - рассчитывается критерий  $\chi^2$  (мера расхождения)

$$\chi^2 = N \cdot \sum_{i=1}^k (\hat{P}_i - P_i)^2 / P_i,$$

где  $P_i = f(\tilde{t}_i) \Delta t$  – теоретическая частота (вероятность) попадания случайной величины в интервал  $[t_i, t_i + \Delta t]$ ; - определяется число степеней свободы  $R = k - L$ ,

где  $L$  – число независимых условий, наложенных на частоты  $\hat{P}_i$ , например:

а) условие  $\sum \hat{P}_i = 1$ ;

б) условие совпадения  $\sum \tilde{t}_i \cdot \hat{P}_i = T_0$ ;

в) условие совпадения  $\sum (\tilde{t}_i - T_0)^2 \cdot \hat{P}_i = D$  и т. д.

Чаще всего  $L = 3$ . Чем больше число степеней свободы, тем больше случайная величина  $\chi^2$  подчиняется распределению Пирсона;

- по рассчитанным  $\chi^2$  и  $R$  определяется вероятность  $P$  того, что величина, имеющая распределение Пирсона с  $R$  степенями свободы, превзойдет рассчитанное значение  $\chi^2$ .

Ответ на вопрос: насколько мала должна быть вероятность  $P$ , чтобы отбросить гипотезу о выборе того или иного закона распределения – во многом неопределенный.

На практике, если  $P < 0,1$ , то рекомендуется подыскать другой закон распределения.

В целом, с помощью критерия согласия, можно опровергнуть выбранную гипотезу, если же  $P$  достаточно велика, то это не может служить доказательством правильности гипотезы, а указывает лишь на то, что гипотеза не противоречит данным эксперимента.

## 2.2 НОРМАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА

### 2.2.1 Классическое нормальное распределение

Нормальное распределение или распределение Гаусса является наиболее универсальным, удобным и широко применяемым.

Считается, что наработка подчинена нормальному распределению (нормально распределена), если плотность распределения отказов (ПРО) описывается выражением:

$$f(t) = \frac{1}{b \sqrt{2 \pi}} \exp \left\{ - \frac{(t - a)^2}{2b^2} \right\}, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры распределения, соответственно, МО и СКО, которые по результатам испытаний принимаются:

$$a \approx T_0; \quad b^2 \approx D,$$

где  $T_0, D$  – оценки средней наработки и дисперсии.

Графики изменения показателей безотказности при нормальном распределении приведены на рис. 1.

Выясним смысл параметров  $T_0$  и  $S$  нормального распределения. Из графика  $f(t)$  видно, что  $T_0$  является центром симметрии распределения, поскольку при изменении знака разности  $(t - T_0)$  выражение (1) не меняется. При  $t = T_0$  ПРО достигает своего максимума

$$f(t)_{\max} \Big|_{t=T_0} = \frac{1}{S \sqrt{2 \pi}}.$$

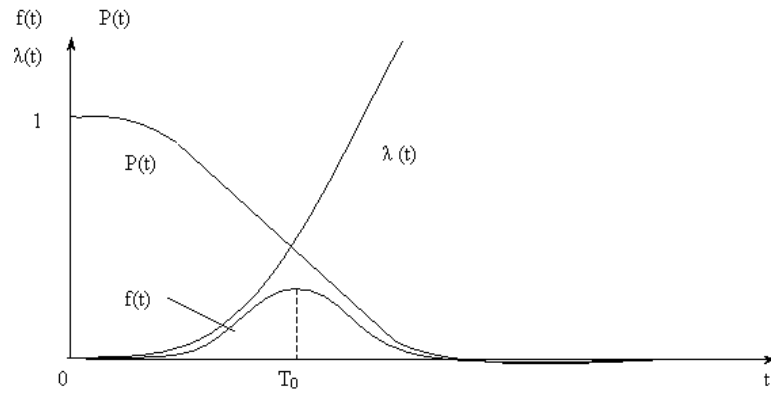


Рис. 1

При сдвиге  $T_0$  влево/вправо по оси абсцисс, кривая  $f(t)$  смещается в ту же сторону, не изменяя своей формы. Таким образом,  $T_0$  является центром рассеивания случайной величины  $T$ , т. е. МО.

Параметр  $S$  характеризует форму кривой  $f(t)$ , т. е. рассеивание случайной величины  $T$ . Кривая ПРО  $f(t)$  тем выше и острее, чем меньше  $S$ .

Изменение графиков  $P(t)$  и  $\lambda(t)$  при различных СКО наработок ( $S1 < S2 < S3$ ) и  $T_0 = const$  приведено на рис. 2.

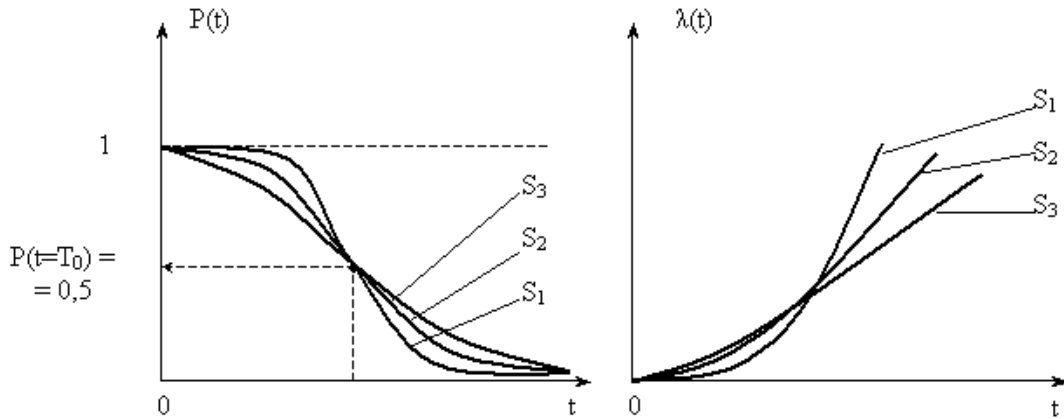


Рис. 2

Используя полученные ранее (лекции 3, 4) соотношения между показателями надежности, можно было бы записать выражения для  $P(t)$ ;  $Q(t)$  и  $\lambda(t)$  по известному выражению (1) для  $f(t)$ . Не надо обладать богатой фантазией, чтобы представить громоздкость этих интегральных выражений, поэтому для практического расчета показателей надежности вычисление интегралов заменим использованием таблиц.

С этой целью перейдем от случайной величины  $T$  к некоей случайной величине

$$x = \frac{t - T_0}{S}, \quad (2)$$

распределенной нормально с параметрами, соответственно, МО и СКО  $M\{X\} = 0$  и  $S\{X\} = 1$  и плотностью распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2). \quad (3)$$

Выражение (3) описывает плотность так называемого нормированного нормального распределения (рис. 3).

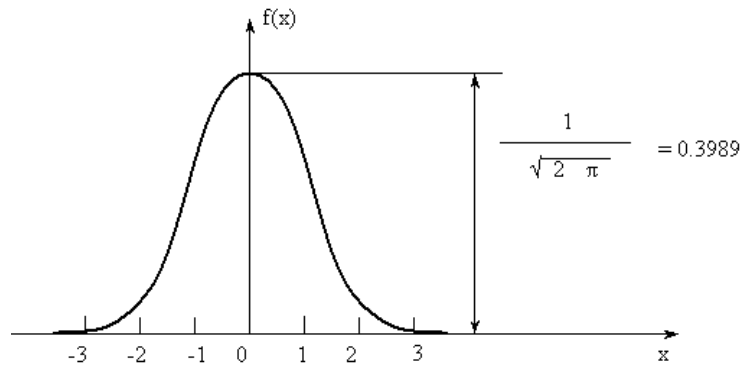


Рис. 3

Функция распределения случайной величины  $X$  запишется



$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx, \quad (4)$$

а из симметрии кривой  $f(x)$  относительно МО  $M\{X\} = 0$ , следует, что  $f(-x) = f(x)$ , откуда  $F(-x) = 1 - F(x)$ . В справочной литературе приведены расчетные значения функций  $f(x)$  и  $F(x)$  для различных  $x = (t - T_0)/S$ . Показатели безотказности объекта через табличные значения  $f(x)$  и  $F(x)$  определяются по выражениям:

$$f(t) = f(x)/S; \quad (5)$$

$$Q(t) = F(x); \quad (6)$$

$$P(t) = 1 - F(x); \quad (7)$$

$$\lambda(t) = f(x)/S(1 - F(x)). \quad (8)$$

В практических расчетах часто вместо функции  $F(x)$  пользуются функцией Лапласа, представляющей распределение положительных значений случайной величины  $X$  в виде:

$$\Phi(x) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-x^2/2) dx. \quad (9)$$

Очевидно, что  $F(x)$  связана с  $\Phi(x)$  следующим образом:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \int_{-\infty}^0 f(x) dx + \int_0^x f(x) dx = 0,5 + \Phi(x). \quad (10)$$

Как и всякая функция распределения, функция  $\Phi(x)$  обладает свойствами:

$$\Phi(x)(-\infty) = -0,5; \Phi(x)(\infty) = 0,5; \Phi(x)(-x) = -\Phi(x).$$

В литературе могут встретиться и другие выражения для  $\Phi(x)$ , поэтому, какой записью  $\Phi(x)$  пользоваться – это дело вкуса. Показатели надежности объекта можно определить через  $\Phi(x)$ , используя выражения (5) – (8) и (10):

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(x); \quad (11)$$

$$P(t) = 0,5 - \Phi(x); \quad (12)$$

$$\lambda(t) = f(x)/S(0,5 - \Phi(x)). \quad (13)$$

Чаще всего при оценке надежности объекта приходится решать *прямую задачу* – при заданных параметрах  $T_0$  и  $S$  нормально распределенной наработки до отказа определяется тот или иной показатель безотказности (например, ВБР) к интересующему значению наработки  $t$ .

Но в ходе проектных работ приходится решать и *обратную задачу* – определение наработки, требуемой по техническому заданию, ВБР объекта.

Для решения подобных задач используют квантили нормированного нормального распределения.

*Квантиль* – значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности.

Обозначим:

$t_p$  – значение наработки, соответствующее ВБР  $P$ ;

$x_p$  – значение случайной величины  $X$ , соответствующее вероятности  $P$ .

Тогда из уравнения связи  $x$  и  $t$ :

$$x_p = \frac{t_p - T_0}{S}$$

при  $x = x_p$ ;  $t = t_p$ , получаем

$$t_p = T_0 + x_p S.$$

$t_p$ ,  $x_p$  – ненормированные и нормированные квантили нормального распределения, соответствующие вероятности  $P$ .

Значения квантилей  $x_p$  приводятся в справочной литературе для  $P \geq 0,5$ .

При заданной вероятности  $P < 0,5$  используется соотношение

$$x_p = -x_{1-p}.$$

Например, при  $P = 0,3$

$$x_{0,3} = -x_{1-0,3} = -x_{0,7}$$

Вероятность попадания случайной величины наработки  $T$  в заданный интервал  $[t_1, t_2]$  наработки определяется:

$$P\{T \in (t_1, t_2)\} = F(x_2) - F(x_1) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1), \quad (14)$$

где  $x_1 = (t_1 - T_0)/S$ ,  $x_2 = (t_2 - T_0)/S$ .

Отметим, что наработка до отказа всегда положительна, а кривая ПРО  $f(t)$ , в общем случае, начинается от  $t = -\infty$  и распространяется до  $t = \infty$ .

Это не является существенным недостатком, если  $T_0 \gg S$ , поскольку по (14) нетрудно подсчитать, что вероятность попадания случайной величины  $T$  в интервал  $P\{T_0 - 3S < T < T_0 + 3S\} \approx 1,0$  с точностью до 1%. А это означает, что все возможные значения (с погрешностью не выше 1%) нормально распределенной случайной величины с соотношением характеристик  $T_0 > 3S$ , находятся на участке  $T_0 \pm 3S$ .

При большем разбросе значений случайной величины  $T$  область возможных значений ограничивается слева (0,  $\infty$ ) и используется усеченное нормальное распределение.

### 2.2.2 Усеченное нормальное распределение

Известно, что корректность использования классического нормального распределения наработки, достигается при  $T_0 \geq 3S$ . При малых значениях  $T_0$  и большом  $S$ , может возникнуть ситуация, когда ПРО  $f(t)$  «покрывает» своей левой ветвью область отрицательных наработок (рис. 4).

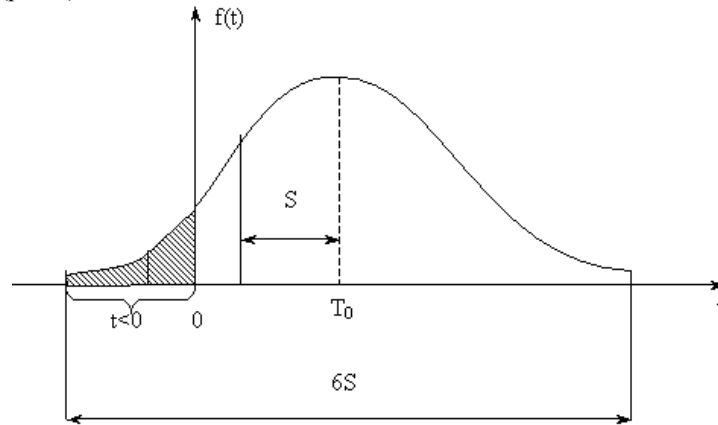


Рис. 4

Таким образом, нормальное распределение являясь общим случаем распределения случайной величины в диапазоне  $(-\infty; \infty)$ , лишь в частности (при определенных условиях) может быть использовано для моделей надежности.

**Усеченным нормальным распределением** называется распределение, получаемое из классического нормального, при ограничении интервала возможных значений наработки до отказа.

В общем случае усечение может быть:

- левым –  $(0; \infty)$ ;
- двусторонним –  $(t_1, t_2)$ .

Смысл усеченного нормального распределения (УНР) рассмотрен для случая ограничения случайной величины наработки интервалом  $(t_1, t_2)$ .

Плотность УНР  $\bar{f}(t) = c f(t)$ ,  
где

$$f(t) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(t - T_0)^2}{2S^2} \right\};$$

$c$  – нормирующий множитель, определяемый из условия, что площадь под кривой  $\bar{f}(t)$  равна 1, т. е.

$$\int_{t_1}^{t_2} \bar{f}(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} c f(t) dt = c \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = 1.$$

Откуда

$$c = \frac{1}{\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt},$$

где

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = P(t_1 < T < t_2) = F(t_2) - F(t_1) = Q(t_2) - Q(t_1),$$

Применяя переход от случайной величины  $T = \{t\}$  к величине  $X = \{x\}$ :

$$x_2 = (t_2 - T_0)/S; \quad x_1 = (t_1 - T_0)/S,$$

получается

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = Q(t_2) - Q(t_1) = 0,5 + \Phi(x_2) - 0,5 - \Phi(x_1) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1)$$

поэтому нормирующий множитель  $c$  равен:

$$c = \frac{1}{\Phi(x_2) - \Phi(x_1)}.$$

Поскольку  $[\Phi(x)(x_2) - \Phi(x)(x_1)] < 1$ , то  $c > 1$ , поэтому  $\bar{f}(t) > f(t)$ . Кривая  $\bar{f}(t)$  выше, чем  $f(t)$ , т. к. площади под кривыми  $\bar{f}(t)$  и  $f(t)$  одинаковы и равны 1 (рис. 5).

$$\int_{T_0 - 3S}^{T_0 + 3S} f(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \bar{f}(t) dt \quad (\text{с погрешностью } \leq 1\%).$$

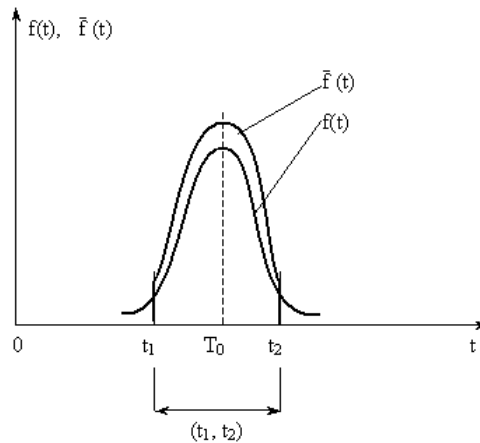


Рис. 5

Показатели безотказности для УНР в диапазоне  $(t_1, t_2)$ :

$$\bar{f}(t) = c f(t) = c f(x) / S;$$

$$\bar{P}(t) = \int_t^{\infty} c f(t) dt = c \int_t^{\infty} f(t) dt = c [0,5 - \Phi(x)];$$

$$\bar{Q}(t) = 1 - c [0,5 + \Phi(x)];$$

$$\bar{\lambda}(t) = \bar{f}(t) / \bar{P}(t) = f(x) / S(0,5 - \Phi(x)) = \lambda(t).$$

УНР для положительной наработки до отказа – диапазон  $(0; \infty)$  имеет ПРО

$$\bar{f}(t) = c_0 f(t),$$

где  $c_0$  – нормирующий множитель определяется из условия:

$$c_0 \int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$

и равен (аналогично предыдущему):

$$c_0 = \frac{1}{\int_0^{\infty} f(t) dt} = \frac{1}{Q(\infty) - Q(0)} = \frac{1}{\Phi(\infty) - \Phi(-T_0/S)} = \frac{1}{0,5 + \Phi(T_0/S)}.$$

Показатели безотказности УНР  $(0; \infty)$

$$\bar{f}(t) = c_0 f(x) / S;$$

$$\bar{P}(t) = c_0 [0,5 - \Phi(x)];$$

$$\bar{Q}(t) = 1 - c_0 [0,5 + \Phi(x)];$$

$$\bar{\lambda}(t) = \lambda(t) = f(t) / S(0,5 - \Phi(x)) = \lambda(t), \quad x = (t - T_0) / S$$

Изменение нормирующего множителя  $c_0$  в зависимости от отношения  $T_0/S$  приведено на рис. 6.

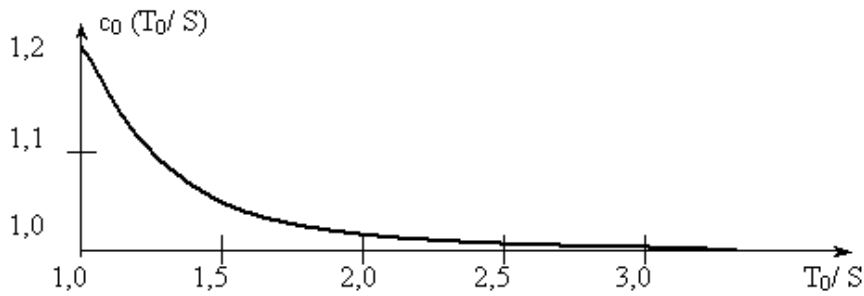


Рис. 6.

При  $T_0 = S$ ,  $T_0/S = 1$   $c_0 = \max(\approx 1,2)$ .  
 При  $T_0/S \geq 2,5$   $c_0 = 1,0$ , т.е.  $\bar{F}(t)(t) = f(t)$ .

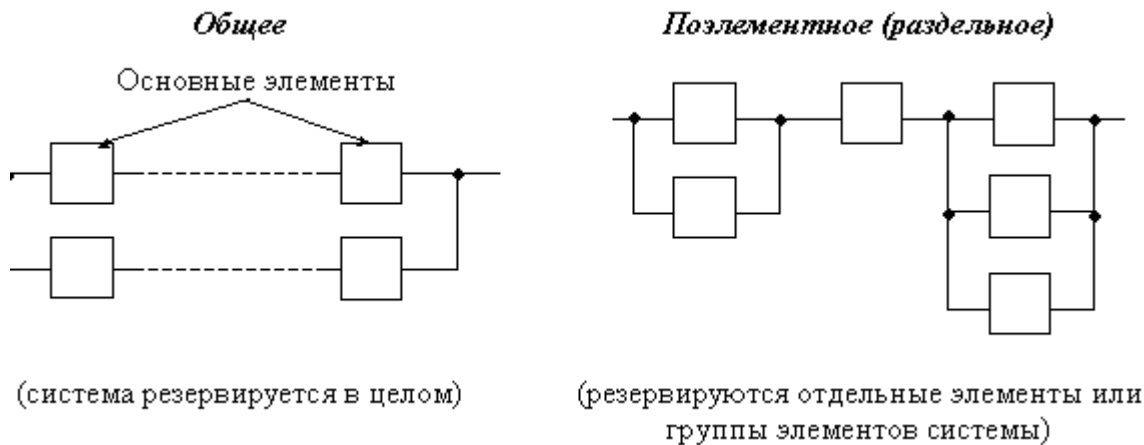
### 2.3 Системы с резервированием. Общие понятия

Работоспособность систем без резервирования требует работоспособности всех элементов системы. В сложных технических устройствах без резервирования никогда не удастся достичь высокой надежности даже, если использовать элементы с высокими показателями безотказности.

**Система с резервированием** – это система с избыточностью элементов, т. е. с резервными составляющими, избыточными по отношению к минимально необходимой (основной) структуре и выполняющими те же функции, что и основные элементы.

В системах с резервированием работоспособность обеспечивается до тех пор, пока для замены отказавших основных элементов имеются в наличии резервные.

*Структурное резервирование может быть:*



По виду резервирование подразделяют на:

- **пассивное (нагруженное)** – резервные элементы функционируют наравне с основными (постоянно включены в работу);
- **активное (ненагруженное)** – резервные элементы вводятся в работу только после отказа основных элементов (резервирование замещением).

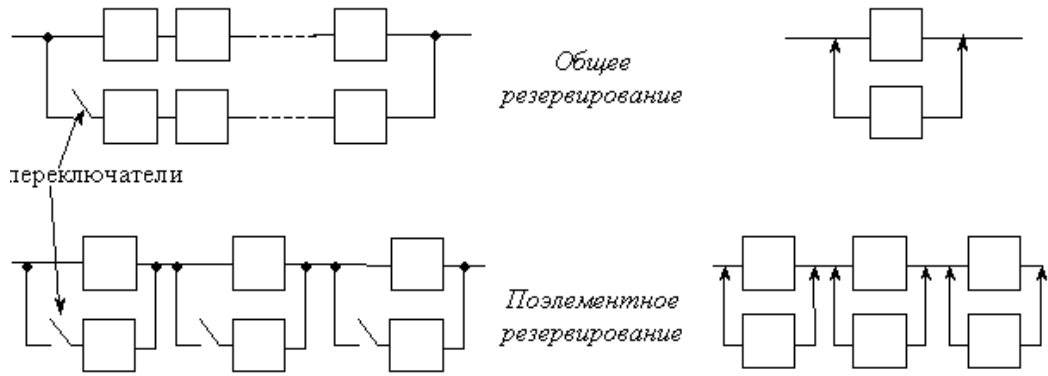
При **нагруженном резервировании** резервные элементы расходуют свой ресурс, имеют одинаковое распределение наработок до отказа и интенсивность отказов основных  $\lambda_o$  и резервных  $\lambda_{ч}$  элементов одинакова ( $\lambda_o = \lambda_{ч}$ ).

При **нагруженном резервировании** различие между основными и резервными элементами часто условное. Для обеспечения нормальной работы (сохранения работоспособности) необходимо, чтобы число работоспособных элементов не становилось меньше минимально необходимого.

Разновидностью нагруженного резервирования является **резервирование с облегченным резервом**, т. е. резервные элементы также находятся под нагрузкой, но меньшей, чем основные. Интенсивность отказов резервных элементов  $\lambda_{об}$  ниже, чем у основных  $\lambda_o$ , т. е.  $\lambda_o > \lambda_{об}$ .

При **нагруженном резервировании** резервные элементы не подвергаются нагрузке, их показатели надежности не изменяются и они не могут отказаться за время нахождения в резерве, т. е. интенсивность отказов резервных элементов  $\lambda_{ч} = 0$ .

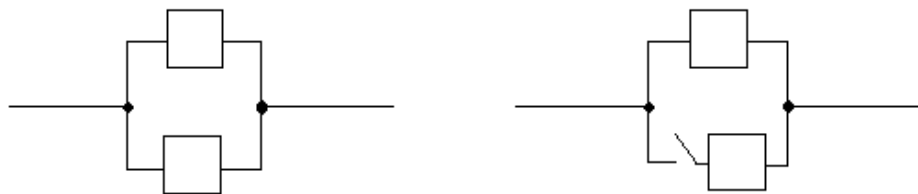
Примеры ненагруженного резервирования:



Резервные элементы включаются в работу только после отказа основных элементов. Переключение производится вручную или автоматически (автоматически – включение резервных машин и элементов в энергетике, в бортовых сетях судов и самолетов и т. д.; вручную – замена инструмента или оснастки при производстве, включение эскалаторов в метро в часы «пик» и т. д.).

Разновидностью ненагруженного резервирования является *скользящее резервирование*, когда один и тот же резервный элемент может быть использован для замены любого из элементов основной системы.

Если рассмотреть два характерных вида резервирования:



то очевидно, что при равенстве числа основных и резервных элементов ненагруженный резерв обеспечивает большую надежность. Но это справедливо только тогда, когда перевод резервного элемента в работу происходит абсолютно надежно (т. е. ВБР переключателя должна быть равна 1,0). Выполнение этого условия связано со значительными техническими трудностями или является иногда нецелесообразным по экономическим или техническим причинам.

Обозначим:

$n$  – число однотипных элементов в системе;

$r$  – число элементов, необходимых для функционирования системы.

*Кратность резервирования* – это соотношение между общим числом однотипных элементов и элементов, необходимых для работы системы:

$$k = (n - r) / r.$$

Кратность резервирования может быть целой, если  $r = 1$ , или дробной, если  $r > 1$ .

### 3. НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВНОЙ СИСТЕМЫ. НАДЕЖНОСТЬ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ. НАДЕЖНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗАХ.

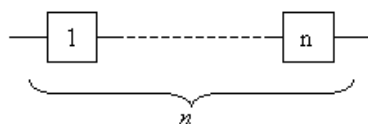
#### 3.1 Надежность основной системы:

Основные системы (ОС) являются простейшими техническими системами, в которых отказ одного элемента приводит к отказу всей системы.

*Работоспособность основной системы обеспечивается при условии, когда все  $n$  элементов системы находятся в работоспособном состоянии.*

*Структура системы*

*Случайная наработка до отказа:*



$$T_c = \underset{i = \overline{1, n}}{\text{МИН}} \{ T_1, \dots, T_n \} = \underset{i = \overline{1, n}}{\text{МИН}} \{ T_i \}.$$

Поскольку на участке нормальной эксплуатации наработку до отказа можно описать экспоненциальным распределением каждого элемента

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_i \cdot t),$$

где  $\lambda_i = \text{const}$ , то

$$\text{ВБР ОС: } P_c(t) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i \cdot t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right).$$

Используя уравнение связи показателей безотказности, выражающее ВБР любого объекта, в том числе и системы

$$P_c(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t) dt\right\},$$

и полагая

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_c \cdot t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right),$$

получаем, что интенсивность отказов (ИО) ОС равна сумме ИО элементов:

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

В общем случае, для любого распределения наработки ИО системы равна:

$$\lambda_c(t) = \lambda_1(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t).$$

Для  $n$  идентичных элементов  $\lambda_1(t) = \dots = \lambda_n(t) = \lambda(t)$ :

Выражения для МО наработки до отказа получены из формулы:

$$\begin{aligned} T_{0c} &= \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-t \cdot \lambda_c) dt = -\frac{1}{\lambda_c} \exp(-t \cdot \lambda_c) \Big|_0^{\infty} \\ &= -\frac{1}{\lambda_c} [\exp(-\infty) - \exp(0)] = -\frac{1}{\lambda_c} (0 - 1) = \frac{1}{\lambda_c}. \end{aligned}$$

ПРО:  $f_c(t) = -d P_c(t)/dt = \lambda_c \exp(-t \cdot \lambda_c); \quad f_c(t) = n \cdot \lambda \cdot \exp(-n \cdot t \cdot \lambda).$

Таким образом, при экспоненциальной наработке до отказа каждого из  $n$  элементов, распределение наработки до отказа ОС также подчиняется экспоненциальному распределению.

Для ОС надежность меньше надежности каждого из элементов. С увеличением числа элементов надежность ОС уменьшается.

Например, при  $n = 1000$ ,  $P_i(t) = 0,99$ ,  $P_c(t) < 10^{-4}$  и средняя наработка до отказа системы в 1000 раз меньше средней наработки каждого из элементов.

### Распределение норм надежности основной системы по элементам.

Рассмотренные модели позволяют определить показатели безотказности ОС по известным показателям надежности элементов – так решается задача при завершении технического проекта, после испытаний опытных образцов системы и составляющих элементов.

Иначе: значения  $P_i(t)$   $i$ -х элементов хорошо известны и лишь уточняется значение  $P_c(t)$  и сравнивается с заданным в ТЗ на проект. При этом, если  $P_c(t)$  получается меньшей, чем в ТЗ, то принимаются меры по ее повышению (резервирование, использование более надежных элементов и т. п.).

На начальной стадии проектирования в ТЗ указывается лишь ВБР проектируемой системы. При проектировании используются как элементы с известной надежностью, так и элементы, о надежности которых можно судить лишь по их аналогам (прототипам). При этом необходима предварительная оценка надежности элементов, которая, в дальнейшем, уточняется в ходе испытания опытных образцов системы и элементов.

Существуют различные способы распределения норм надежности:

- по принципу равнонадежности элементов;
- с учетом данных об аналогах элементов;
- с учетом перспектив совершенствования элементов.

**Выбор того или иного способа** зависит от имеющейся информации о проектируемой системе.

1. **Распределение надежности по принципу равнонадежности элементов:**

Задано: по техническому заданию  $P_c(t)$ ;  $n$  – число элементов системы.

Распределение наработки до отказа элементов – экспоненциальное.

При идентичных (равнонадежных) элементах ( $\lambda_1 = \dots = \lambda_i = \dots = \lambda_n = \lambda$ ):

$$\lambda_c = n \cdot \lambda; \quad T_{0c} = \frac{1}{n} T_0.$$

интенсивность отказа  $i$ -го элемента:  $\ln P_c(t) = -n \cdot \lambda \cdot t$ .

$$\lambda = \frac{1}{n} \cdot (-\ln P_c(t) / t).$$

2. Распределение надежности с учетом данных о надежности аналогов.

Задано: по техническому заданию ТЗ  $P_c(t)$ ;  $n$  – число элементов системы;

интенсивности отказов аналогов –  $\lambda_{ai}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Определяется доля отказов системы из-за отказов  $i$ -го элемента:

$$k_i = \lambda_{ai} / \lambda_{ac},$$

$$\lambda_{ac} = \sum_{i=1}^n \lambda_{ai}$$

где – ИО системы по данным об аналогах.

Определяется ИО проектируемой системы:  $P_c(t) = \exp(-\lambda_c \cdot t)$

$$\lambda_c = -\ln P_c(t) / t (\lambda_c > 0; \ln P(t) < 0),$$

и ИО составляющих элементов:

$$\lambda_i = k_i \cdot \lambda_c.$$

3. Распределение надежности с учетом перспектив совершенствования элементов.

Задано: по техническому заданию ТЗ  $P_c(t)$ ;  $n$  – число элементов системы;

Изменение ИО аналогов за временной период [19XY по 200Z] годы, аппроксимировано выражением  $\lambda_{ai} = \hat{\varphi}(\lambda_{ai}, 19 XY)$ , где  $\lambda_{ai}$  – ИО  $i$ -го аналога в 19XY году.

По выражению  $\lambda_{ai} = \hat{\varphi}(\lambda_{ai}, 19 XY)$  экстраполируется ИО элементов – аналогов к нынешнему году (году проектирования системы), получаются:  $\lambda_{ai(94)}, \dots, \lambda_{ai(94)}, \dots$

Определяется доля отказов системы из-за отказов  $i$ -го элемента:

$$k_i = \lambda_{ai(94)} / \lambda_{ac(94)}, \text{ где } \lambda_{ac(94)} = \sum_{i=1}^n \lambda_{ai(94)},$$

и ИО элементов системы:

$$\lambda_i = k_i \cdot \lambda_c = k_i \cdot (-\ln P_c(t) / t).$$

Принципы распределения показателей надежности по 2 и 3 способам отличаются лишь экстраполяцией значений на год проектирования.

## 3.2. НАДЕЖНОСТЬ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ

### Постановка задачи. Общая расчетная модель

При расчете показателей надежности восстанавливаемых объектов и систем наиболее распространено *допущение*:

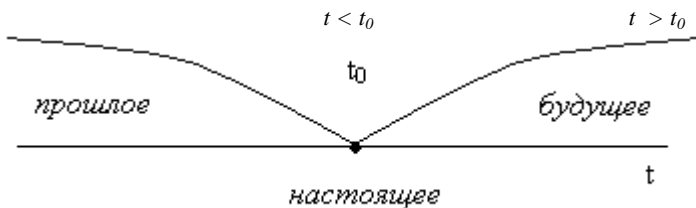
- экспоненциальное распределение наработки между отказами;
- экспоненциальное распределение времени восстановления.

Допущение во многом справедливо, поскольку во-первых, экспоненциальное распределение наработки описывает функционирование системы на участке нормальной эксплуатации, во-вторых, экспоненциальное распределение описывает процесс без «предыстории».

Применение экспоненциального распределения для описания процесса восстановления позволяет при ординарных независимых отказах представить анализируемые системы в виде *марковских систем*.

При экспоненциальном распределении наработки между отказами и времени восстановления, для расчета надежности используют *метод дифференциальных уравнений для вероятностей состояний (уравнений Колмогорова-Чепмена)*.

Случайный процесс в какой либо физической системе  $S$ , называется *марковским*, если он обладает *следующим свойством*: для любого момента  $t_0$  вероятность состояния системы в будущем ( $t > t_0$ ) зависит только от состояния в настоящем ( $t = t_0$ ) и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние (иначе: при фиксированном настоящем будущее не зависит от предыстории процесса - прошлого).



Для марковского процесса «будущее» зависит от «прошлого» только через «настоящее», т. е. будущее протекание процесса зависит только от тех прошедших событий, которые повлияли на состояние процесса в настоящий момент.

Марковский процесс, как процесс без последствия, не означает полной независимости от прошлого, поскольку оно проявляется в настоящем.

При использовании метода, в общем случае, для системы  $S$ , необходимо иметь *математическую модель* в виде множества состояний системы  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , в которых она может находиться при отказах и восстановлениях элементов.

Для рассмотрения принципа составления модели введены допущения:

- отказавшие элементы системы (или сам рассматриваемый объект) немедленно восстанавливаются (начало восстановления совпадает с моментом отказа);
- отсутствуют ограничения на число восстановлений;
- если все потоки событий, переводящих систему (объект) из состояния в состояние, являются пуассоновскими (простейшими), то случайный процесс переходов будет марковским процессом с непрерывным временем и дискретными состояниями  $S_1, S_2, \dots, S_n$ .

**Основные правила составления модели:**

1. Математическую модель изображают в виде графа состояний.

Элементы графа:

а) кружки (вершины графа  $S_1, S_2, \dots, S_n$ ) – возможные состояния системы  $S$ , возникающие при отказах элементов;

б) стрелки – возможные направления переходов из одного состояния  $S_i$  в другое  $S_j$ .

Над/под стрелками указываются интенсивности переходов.

Примеры графа:



$S_0$  – работоспособное состояние;

$S_1$  – состояние отказа.

«Петлей» обозначаются задержки в том или ином состоянии  $S_0$  и  $S_1$  соответствующие:

- исправное состояние продолжается;

- состояние отказа продолжается (в дальнейшем петли на графах не рассматриваем).

Граф состояний отражает конечное (дискретное) число возможных состояний системы  $S_1, S_2, \dots, S_n$ . Каждая из вершин графа соответствует одному из состояний.

2. Для описания случайного процесса перехода состояний (отказ/ восстановление) применяют вероятности состояний

$P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t), \dots, P_n(t)$ ,

где  $P_i(t)$  – вероятность нахождения системы в момент  $t$  в  $i$ -м состоянии, т. е.

$P_i(t) = P\{S(t) = si\}$ .

Очевидно, что для любого  $t$

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1. \quad (1)$$

(нормировочное условие, поскольку иных состояний, кроме  $S_1, S_2, \dots, S_n$  нет).

3. По графу состояний составляется система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (уравнений Колмогорова-Чепмена), имеющих вид:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{l=1}^{\theta} \lambda_{li} P_l(t) - P_i(t) \sum_{j=1}^{\overline{q}} \lambda_{ij}, \quad j = \overline{1, q}; \quad l = \overline{1, \theta} \quad (2)$$

В общем случае, интенсивности потоков  $\lambda_{ij}$  и  $\mu_{ij}$  могут зависеть от времени  $t$ .

При составлении дифференциальных уравнений пользуются простым mnemonicским правилом:

а) в левой части – производная по времени  $t$  от  $P_i(t)$ ;

б) число членов в правой части равно числу стрелок, соединяющих рассматриваемое состояние с другими состояниями;

в) каждый член правой части равен произведению интенсивности перехода на вероятность того состояния, из которого выходит стрелка;

г) знак произведения положителен, если стрелка входит (направлена острием) в рассматриваемое состояние, и отрицателен, если стрелка выходит из него.

Проверкой правильности составления уравнений является равенство нулю суммы правых частей уравнений.

4. Чтобы решить систему дифференциальных уравнений для вероятностей состояний  $P_1(t), P_i(t), \dots, P_n(t)$  необходимо задать начальное значение вероятностей

$P_1(0), P_i(0), \dots, P_n(0)$ , при  $t = 0$ ,  
сумма которых равна единице:

$$\sum_{i=1}^n P_i(0) = 1.$$



Если в начальный момент  $t = 0$  состояние системы известно, например,  $S(t=0) = S_i$ , то  $P_i(0) = 1$ , а остальные равны нулю.

### Показатели надежности восстанавливаемых систем

Все состояния системы  $S$  можно разделить на подмножества:

$S_K \subset S$  – подмножество состояний  $j \in \overline{1, K}$ , в которых система работоспособна;

$S_M \subset S$  – подмножество состояний  $z \in \overline{1, M}$ , в которых система неработоспособна.

$S = S_K \cup S_M$ ,

$S_K \cap S_M = \emptyset$ .

1. **Функция готовности  $\Gamma(t)$  системы** определяет вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии в момент  $t$

$$\Gamma(t) = \sum_{j=1}^K P_j(t) = 1 - \sum_{z=1}^M P_z(t),$$

где  $P_j(t)$  – вероятность нахождения системы в работоспособном  $j$ -м состоянии;

$P_z(t)$  – вероятность нахождения системы в неработоспособном  $z$ -м состоянии.

2. **Функция простоя  $\Pi(t)$  системы**

$$\Pi(t) = 1 - \Gamma(t) = \sum_{z=1}^M P_z(t).$$

3. **Коэффициент готовности  $k_{z.c.}$  системы** определяется при установившемся режиме эксплуатации (при  $t \rightarrow \infty$ ). При  $t \rightarrow \infty$  устанавливается предельный стационарный режим, в ходе которого система переходит из состояния в состояние, но вероятности состояний уже не меняются

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t) = P_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Коэффициент готовности  $k_{z.c.}$  можно рассчитать по системе (2) дифференциальных уравнений, приравняв нулю их левые части  $dP_i(t)/dt = 0$ , т.к.  $P_i = const$  при  $t \rightarrow \infty$ . Тогда система уравнений (2) превращается в систему алгебраических уравнений вида:

$$0 = \sum_{l=1}^{\theta} \lambda_{li} P_l - P_i \sum_{j=1}^{\varphi} \lambda_{ij}, \quad (3)$$

и коэффициент готовности:

$$k_{z.c.} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t),$$

есть предельное значение функции готовности при установившемся режиме  $t \rightarrow \infty$ .

4. **Параметр потока отказов системы**

$$\omega(t) = \sum_{j=1}^K \sum_{z=1}^M \lambda_{jz} P_j(t), \quad (4)$$

где  $\lambda_{jz}$  – интенсивности (обобщенное обозначение) переходов из работоспособного состояния в неработоспособное.

*Примечание:* При  $t \rightarrow \infty$ , когда  $P_j(t = \infty) = P_j(\infty) = P_j$ , средняя наработка между отказами

$T_0 = k_{z.c.} / \omega$ ,

где  $\omega(\infty) = \omega$ .

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T_0(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_0^t \Gamma(t) dt}{\int_0^t \omega(t) dt} = \left| \lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t) = k_{z.c.}, \lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \omega \right| = k_{z.c.} / \omega = T_0.$$

В качестве примера вычисления показателей надежности, рассмотрен восстанавливаемый объект, у которого поток отказов простейший (пуассоновский) с параметром потока

$\omega = \lambda = 1/T_0$ ,

а распределение времени восстановления подчиняется экспоненциальному распределению с интенсивностью восстановления

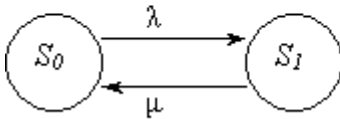
$\mu = 1/T_B$ ,

где  $T_0$  – средняя наработка между отказами;

$T_B$  – среднее время восстановления.

Состояния элемента:  $S_0$  – работоспособное;  $S_1$  – неработоспособное.

Граф состояний:



$P_0(t)$  – вероятность работоспособного состояния при  $t$ ;  
 $P_1(t)$  – вероятность неработоспособного состояния при  $t$ .

$P_0(t)$  – вероятность работоспособного состояния при  $t$ ;  
 $P_1(t)$  – вероятность неработоспособного состояния при  $t$ .  
 Система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} dP_0(t)/dt = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ dP_1(t)/dt = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t). \end{cases} \quad (7)$$

Начальные условия: при  $t = 0$   $P_0(t = 0) = P_0(0) = 1$ ;  $P_1(0) = 0$ , поскольку состояния  $S_0$  и  $S_1$  представляют полную группу событий, то

$$P_0(t) + P_1(t) = 1. \quad (8)$$

Выражая  $P_0(t) = 1 - P_1(t)$ , и подставляя в (7) получается одно дифференциальное уравнение относительно  $P_1(t)$ :

$$dP_1(t)/dt = \lambda(1 - P_1(t)) - \mu P_1(t). \quad (9)$$

Решение уравнения (9) производится с использованием преобразования Лапласа.

Преобразование Лапласа для вероятностей состояния  $P_1(t)$ :

$$P_1(S) = \int_0^{\infty} P_1(t) e^{-St} dt,$$

т. е.  $P_1(S) = L\{P_1(t)\}$  – изображение вероятности  $P_1(t)$ .

Преобразование Лапласа для производной  $dP_1(t)/dt$ :

$$L\{dP_1(t)/dt\} = \int_0^{\infty} dP_1(t)/dt e^{-St} dt = -P_1(0) + SP_1(S).$$

После применения преобразования Лапласа к левой и правой частям уравнения, получено уравнение изображений:

$$dP_1(t)/dt = \lambda - P_1(t)(\lambda + \mu).$$

$$L\{dP_1(t)/dt\} = L\{\lambda\} - L\{P_1(t)(\lambda + \mu)\}. \quad (9)$$

$$-P_1(0) + SP_1(S) = \lambda/S - P_1(S)(\lambda + \mu),$$

где  $L\{\lambda\} = \lambda L\{1\} = \lambda/S$ .

При  $P_1(0) = 0$

$$SP_1(S) + P_1(S)(\lambda + \mu) = \lambda/S.$$

$$P_1(S)(S + \lambda + \mu) = \lambda/S,$$

откуда изображение вероятности нахождения объекта в неработоспособном состоянии:

$$P_1(S) = \frac{\lambda}{S(S + \lambda + \mu)}. \quad (10)$$

Разложение дроби на элементарные составляющие приводит к:

$$\frac{\lambda}{S(S + \lambda + \mu)} = \left| \lambda + \mu = a \right| = \frac{a - \mu}{S(S + a)} = \frac{a - \mu}{a} \cdot \frac{a}{S(S + a)} =$$

$$= \frac{a - \mu}{a} \cdot [1/S + 1/(S + a)].$$

Применяя обратное преобразование Лапласа, с учетом:  
 $L\{f(t)\} = 1/S$ , то  $f(t) = 1$ ;

$$L\{f(t)\} = 1/(S + a), \text{ то } f(t) = e^{-at},$$

С помощью полученных выражений можно рассчитать вероятность работоспособного состояния и отказа восстанавливаемого объекта в любой момент  $t$ .

Коэффициент готовности системы кг.с. определяется при установившемся режиме  $t \rightarrow \infty$ , при этом  $P_i(t) = P_i = const$ , поэтому составляется система алгебраических уравнений с нулевыми левыми частями, поскольку

$$dP_i(t)/dt = 0.$$

Так как кг.с есть вероятность того, что система окажется работоспособной в момент  $t$  при  $t \rightarrow \infty$ , то из полученной системы уравнений определяется  $P_0 = \text{кг.с.}$

При  $t \rightarrow \infty$  алгебраические уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda P_0 + \mu P_1; \\ 0 = \lambda P_0 - \mu P_1. \end{cases} \quad (13)$$

Дополнительное уравнение:  $P_0 + P_1 = 1$ .

Выражая  $P_1 = 1 - P_0$ , получаем  $0 = \lambda P_0 - \mu(1 - P_0)$ , или  $\mu = P_0(\lambda + \mu)$ , откуда

$$P_0 = k_{г.с} = \mu / (\lambda + \mu). \quad (14)$$

Остальные показатели надежности восстанавливаемого элемента:

- функция готовности  $\Gamma(t)$ , функция простоя  $\Pi(t)$

$$\Gamma(t) = P_0(t); \quad \Pi(t) = 1 - \Gamma(t) = P_1(t).$$

- параметр потока отказов  $\omega(t)$  по (4)

$$\omega(t) = \lambda P_0(t) = \lambda \Gamma(t).$$

При  $t \rightarrow \infty$  (стационарный установившийся режим восстановления)

$$\omega(t) = \omega(\infty) = \omega = \lambda P_0 = \lambda k_{г.с}.$$

- ведущая функция потока отказов ( $t \rightarrow \infty$ )

$$\Gamma(t) = P_0(t); \quad \Pi(t) = 1 - \Gamma(t) = P_1(t).$$

- средняя наработка между отказами ( $t \rightarrow \infty$ )

$$t_0 = \text{кг.с.} / \omega = \text{кг.с.} / \lambda k_{г.с} = 1 / \lambda.$$

На рис. приведено изменение вероятности нахождения объекта в работоспособном состоянии.

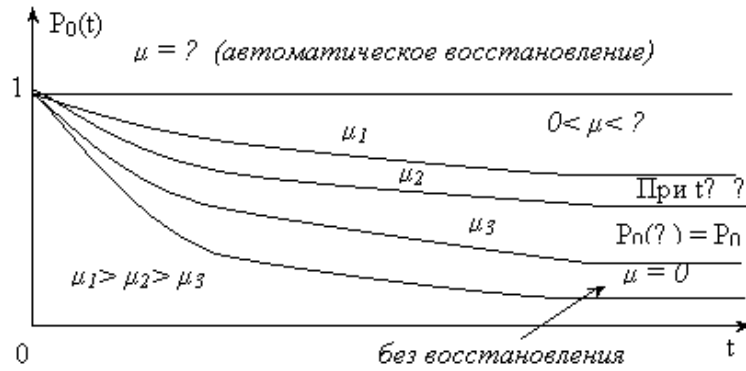


Рис. 1

Анализ изменения  $P_0(t)$  позволяет сделать выводы:

1) При мгновенном (автоматическом) восстановлении работоспособности ( $\mu = \infty$ )

$\lambda/\mu = 0$  и  $P_0(t) = 1$ .

2) При отсутствии восстановления ( $\mu = 0$ )

$\lambda/\mu = \infty$  и  $P_0(t) = e^{-\lambda t}$ ,

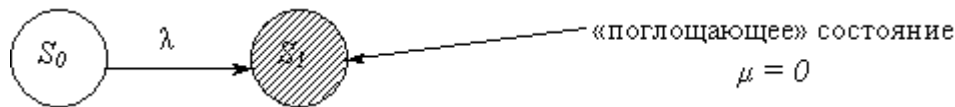
и вероятность работоспособного состояния объекта равна ВБР невосстанавливаемого элемента.

*Некоторые дополнения по применению метода дифференциальных уравнений для оценки надежности.*

Метод дифференциальных уравнений может быть использован для расчета показателей надежности и невосстанавливаемых объектов (систем).

В этом случае неработоспособные состояния системы являются «поглощающими» и интенсивности  $\mu$  выхода из этих состояний исключаются.

Для невосстанавливаемого объекта граф состояний имеет вид:



Система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} dP_0(t)/dt = -\lambda P_0(t); \\ dP_1(t)/dt = \lambda P_0(t). \end{cases}$$

Начальные условия:  $P_0(0) = 1; P_1(0) = 0$ .

Изображение по Лапласу первого уравнения системы:

$$L\{dP_0(t)/dt\} = -\lambda L\{P_0(t)\};$$

$$-P_0(0) + SP_0(S) = -\lambda P_0(S).$$

После группировки:

$$SP_0(S) + \lambda P_0(S) = 1;$$

$$P_0(S)(S + \lambda) = 1,$$

откуда

$$P_0(S) = 1/(S + \lambda).$$

Используя обратное преобразование Лапласа, оригинал вероятности нахождения в работоспособном состоянии, т. е. ВБР к наработке  $t$ :

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}.$$

**Связь логической схемы надежности с графом состояний**

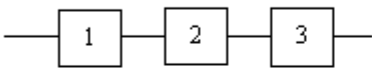
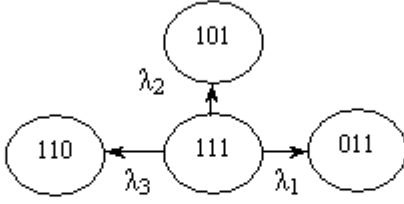
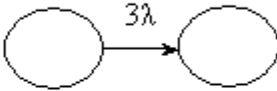
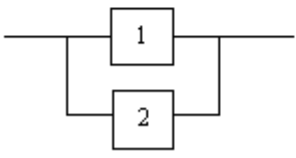
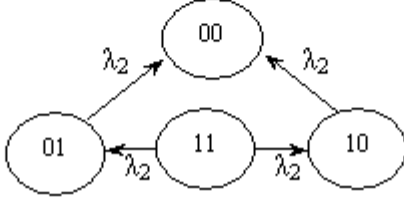

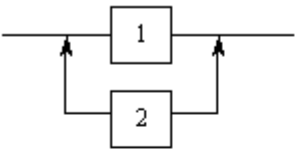
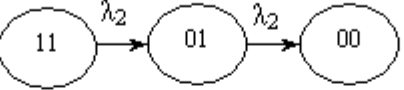

Переход от логической схемы к графу состояний необходим:

1) при смене методов расчета надежности и сравнении результатов;



2) для оценки выигрыша в надежности при переходе от невосстанавливаемой системы к восстанавливаемой.

Рассмотрим типовые логические структуры надежности. Типовые соединения рассмотрены для невосстанавливаемых систем (граф – однонаправленный, переходы характеризуются ИО  $\lambda$ ).

Для восстанавливаемых систем в графах состояний добавляются обратные стрелки, соответствующие интенсивностям восстановлений  $\mu$ .

Структурная логическая схема	Графы состояний	
	Элементы различной надежности	Равнонадежные элементы
		
		
		

Обозначения на графах состояний:

- 1)  - работоспособное состояние;  
 - неработоспособное состояние.

- 2) обозначения внутри кружков:  
 1 - работоспособное состояние элемента;  
 0 – неработоспособное состояние элемента

### 3.3 НАДЕЖНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗАХ.

#### Состав рассчитываемых показателей

Как отмечалось ранее (лекция 14), при выходе значений ОП  $X(t)$  за границу  $X_n$  рабочей области происходит отказ объекта. Для характеристики надежности объекта при постепенных отказах, связанных со случайным процессом изменения ОП  $X(t)$ , могут вычисляться показатели двух типов:

1) *вероятность нахождения объекта в работоспособном состоянии* (доля работоспособных объектов), т.е. ВБР к наработке (времени)  $t_i$   $P(t_i) = P\{X(t_i) < X_n\}$ . При этом рассматривается случайная величина - значение ОП в момент времени (наработки)  $t_i$ ;

2) *показатели наработки (времени) до появления постепенного отказа* - пересечение ОП границы  $X_n$  поля допуска. Для оценки надежности в этом случае могут использоваться: плотность распределения наработки до отказа  $f(t) = f\{X(t)\}$ , функция надежности (ВБР)  $P(t) = P\{T > t\}$ , интенсивность отказов  $\lambda(t)$ .

Рассмотрим модели расчета представленных типов показателей. Считаем, что объект работоспособен, если значения его ОП будут меньше границы  $X_n$  поля допуска.

1.1. Вероятность нахождения в работоспособном состоянии

Для фиксированного момента времени  $t_i$  вероятность того, что объект работоспособен, равна

$$P(t_i) = P\{X(t_i) < X_n\} = \int_0^{X_n} f(X) dx \quad (1)$$

где  $f(X)_i$  - плотность распределения значений ОП при  $t = t_i$ , т.е. в  $i$ -м сечении случайного процесса  $X(t)$ . В частном случае при нормальном распределении ОП вероятность  $P(t_i)$  определяется

$$P(t_i) = \frac{1}{S_{Xi} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{X_n} \exp\{- (X_i - m_{Xi})^2 / 2S_{Xi}^2\} dx \quad (2)$$

где  $m_{Xi}$ ,  $S_{Xi}$  - указанные ранее параметры (числовые характеристики) распределения случайного ОП  $X_i = \{X\}_i$ . Переходя к случайной величине

$$z = \frac{X - m_{Xi}}{S_{Xi}}, \quad (3)$$

имеющей нормальное распределение с параметрами, соответственно, МО и СКО  $M\{Z\} = 0$ ,  $S\{Z\} = 1$  и плотностью распределения

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\{- z^2/2\}, \quad (4)$$

выражение (2) можно записать через функцию Лапласа  $\Phi(z)$

$$P(t_i) = P\{X(t_i) < X_n\} = 0.5 + \Phi(z), \quad (5)$$

где  $\Phi(z)$  определяется по выражению

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^z \exp\{- U^2/2\} dU, \quad (6)$$

и является табулированной.

1.2. Плотность распределения наработки до отказа

При случайном процессе изменения ОП, имеющем монотонные реализации, плотность распределения времени выхода ОП за границу  $X_n$  рабочей области (плотность распределения времени до отказа) для момента  $t_i$  равна

$$f(t_i) = - dP(t)/dt|_{t=t_i} = dQ(t)/dt|_{t=t_i} \quad (7)$$

где  $Q(t_i)$  - вероятность нахождения объекта в неработоспособном состоянии, определяемая через известную по (1)  $P(t_i)$

$$Q(t_i) = P\{X(t_i) \geq X_n\} = 1 - P(t_i). \quad (8)$$

С учетом выражений (1) и (8) вероятность нахождения объекта в неработоспособном состоянии

$$Q(t_i) = P\{X(t_i) \geq X_n\} = 1 - \int_0^{X_n} f(X) dX_i = \int_{X_n}^{\infty} f(X) dX_i \quad (9)$$

а с учетом функции Лапласа  $\Phi(z)$  при нормальном распределении ОП в  $t_i$ ,  $i = \overline{0, k}$  сечениях

$$Q(t_i) = 0.5 - \Phi(z). \quad (10)$$

### Общие модели расчета плотности распределения наработки до отказа

На практике вычисление плотности распределения наработки до постепенного отказа объекта при случайном изменении ОП проводится двумя путями, использование каждого из которых зависит от вида случайного процесса  $X(t)$ .

1. *Случайный процесс  $X(t)$  отличен от линейного.* Для каждого интервала наработки  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$  определяется среднее на этом интервале значение плотности распределения наработки до отказа путем деления приращения вероятности того, что объект находится в неработоспособном состоянии, на длину интервала

$$[f]_{cp} = \frac{Q(t_{i+1}) - Q(t_i)}{t_{i+1} - t_i} = \frac{P(t_i) - P(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i}. \quad (11)$$

По полученным значениям  $[f]_{cp}$ , в  $i = \overline{0, k}$  сечениях строится гистограмма распределения времени до отказа, которая сглаживается непрерывной кривой. При этом возможно подобрать закон распределения с проверкой непротиворечия расчетным данным по критерию Пирсона.

Для вычисления  $[f]_{cp}$ , соответствующего интервалу  $\Delta t_i$ , необходимо знать закон распределения ОП в начале ( $t_i$ ) и конце  $t_{i+1} = t_i + \Delta t_i$  этого интервала.

2.2. *Случайный процесс  $X(t)$  линейен.* Формально в этом случае можно использовать первый путь. Поскольку распределение ОП  $f(X)_i$  во всех сечениях нормально, то среднее значение плотности  $[f]_{cp}$ , с учетом выражений (5) и (10) определяется по (11) через функцию Лапласа

$$[f]_{cp} = \frac{\Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i)}{t_{i+1} - t_i}. \quad (12)$$

Для нормально распределенной случайной функции  $X(t)$  при построении гистограммы средних значений  $[f]_{cp}$  достаточно знать лишь ее числовые характеристики  $m_x(t)$  и  $S_x(t)$ , по которым находятся значения  $S_x$ ,  $S_{xi}$ ,  $m_{xi}$ ,  $m_x$ , соответствующие началу  $t_i$  и концу  $t_{i+1}$  каждого из интервалов  $t_i$ , необходимые для определения аргументов функции Лапласа:

$$Z_i = \frac{X_i - m_{xi}}{S_{xi}} ;$$

$$Z_{i+1} = \frac{X_{i+1} - m_{xi+1}}{S_{xi+1}} .$$

Для линейных случайных процессов законы распределения наработки до отказа можно получить аналитически из выражения (7).

### Определение времени сохранения работоспособности

Из рассмотренных показателей надежности объектов при постепенных отказах, вызванных случайным изменением ОП, наиболее важными являются: вероятность нахождения объекта в работоспособном состоянии и плотность  $f(t)$  распределения времени (наработки) до отказа. Последнюю можно также определить как плотность распределения времени достижения ОП границы  $X_n$  рабочей области и обозначить  $f [ X(t) ] = f(t)$ .

Для практических целей организации технического обслуживания объектов и прогнозирования работоспособности при периодическом контроле ОП важно знать конкретное время сохранения работоспособности.

На примере приведенных ранее линейных моделей изменения ОП  $X(t)$  или его логарифма  $\ln X(t) = Y(t)$  (лекция 14) получим распределение  $f [ X(t) ]$  и расчетные выражения для определения времени сохранения работоспособности объекта.

Ниже будут рассматриваться только модели изменения ОП  $X(t)$ . Для линеаризованных путем логарифмирования моделей  $\ln X(t) = Y(t)$  расчетные выражения будут аналогичными.

### 3.1. Верные модели изменения ОП

Для объектов, случайный процесс изменения ОП которых можно представить верными моделями, случайная величина времени достижения ОП  $X(t)$  границы  $X_n$  рабочей области

$$T = \frac{X_n - m_{x0}}{V} \quad (13)$$

будет являться функцией случайной величины - скорости  $V$  изменения ОП, закон распределения которой нормальный. Плотность распределения времени достижения ОП границы  $X_n$  рабочей области определяется по известному из теории вероятностей правилу получения законов распределения функций случайных аргументов:

$$f(t) = f[X(t)] = f(V) |dV/dt|. \quad (14)$$

Для верной функции с нулевым начальным рассеиванием при  $X_0 = K_0 = \text{const}$ , т.е.  $m_{x_0} = X_0$ ,  $S_{x_0} = 0$  плотность распределения  $f[X(t)]$ , определенная по выражению (14), имеет вид

$$f(t) = f[X(t)] = \frac{\beta}{t^2 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\{-\frac{1}{2}(\beta/t - \alpha^2)\}, \quad (15)$$

с параметрами

$$\beta = \frac{X_n - X_0}{S_V}, \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{m_V}{S_V}, \quad (17)$$

где  $\beta$  можно считать неким относительным запасом долговечности объекта, имеющим размерность времени;  $\alpha$  - относительная средняя скорость изменения ОП (параметр  $\alpha$  безразмерен).

Для верной модели с ненулевым начальным рассеиванием (для получения плотности распределения  $f[X(t)]$  выражаем скорость изменения ОП при условии достижения процессом  $X(t)$  границы  $X_n$  рабочей области, т.е.  $X(t) = X_n$  :

$$V = \frac{X_n - X}{t + \tau}. \quad (18)$$

Плотность распределения времени пересечения ОП границы рабочей области, определенная по (14), имеет вид

$$f[X(t)] = \frac{\beta_1}{(t + \tau)^2 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\{-\frac{1}{2}(\beta_1/(t + \tau)t - \alpha^2)\}, \quad (19)$$

в котором параметр распределения  $\alpha$  определяется по (17), а параметр запаса долговечности  $\beta_1$  учитывает смещение "полюса" функции и выражается

$$\beta_1 = \frac{X_n - X}{S_V}, \quad (20)$$



т.е. по виду схож с параметром  $\beta$  распределения (15).

Законы распределения времени до отказа, выраженные плотностями распределения (15) и (19), получили название альфа-распределение.

Абсциссы, имеющие размерность времени, характерных точек кривой плотности распределения  $f[X(t)]$ , определяемой (15) или (19), позволяют определить искомое время  $t_c$  сохранения работоспособности объекта.

Ниже приведены (без вывода) расчетные выражения для определения времени  $t_c$  сохранения работоспособности объекта при следующих моделях  $X(t)$  изменения определяющего параметра (ОП).

Для верной модели  $X(t)$  с нулевым начальным рассеиванием при рассчитанных по (16), (17) параметрах и момент времени  $t_n$ , равный  $t_c$ , определяется:

$$t_n = t_c = \beta \cdot g_n(\alpha) \approx \beta / 2\alpha, \quad (21)$$

Для верной модели  $X(t)$  с ненулевым начальным рассеиванием время сохранения работоспособности также определяется из (21) при замене  $\beta$  на  $\beta_1$  по (20):

$$t_n = t_c - t = \beta_1 \cdot g_n(\alpha) - \tau \approx \beta_1 / 2\alpha - \tau, \quad (22)$$

Координаты  $(\tau, \chi)$  "полюса" функции, от которых зависит определение  $t_c$  по выражению (22), после подстановки в него (20) определяются:

$$\tau = \frac{S_{X0}}{S_Y}, \quad (23)$$

$$\chi = m_{X0} - m_Y \cdot \tau = m_{X0} - \alpha \cdot S_Y \cdot S_{X0} / S_Y = m_{X0} - \alpha \cdot S_{X0}. \quad (24)$$

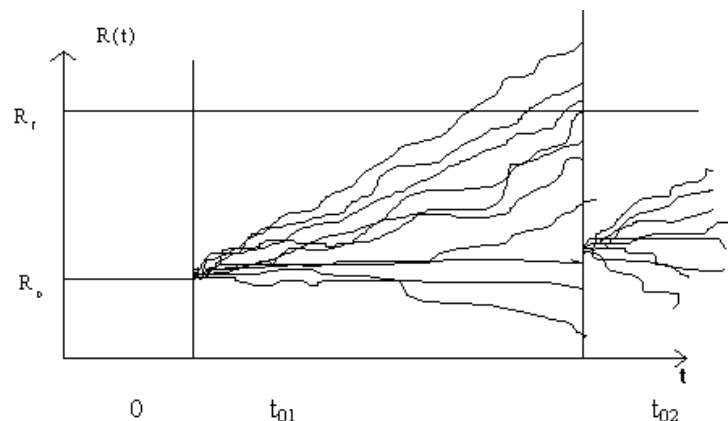
#### Частные вопросы оценки параметрической надежности объектов

##### Оценка надежности объектов при разрегулировании

Помимо рассмотренных параметров, определяющих работоспособность объектов, во многих технических устройствах имеются характеристики, которые можно периодически регулировать, т.е. устанавливать равными номинальным значениям. Среди нескольких регулируемых характеристик объекта можно выбрать основную, которая является мерой его качества и определяет необходимость проведения профилактических работ. По аналогии с нерегулируемым ОП назовем эту характеристику **регулируемым ОП (РОП)**.

При проведении технического обслуживания РОП в момент времени  $t_{01}$  устанавливается равным некоторому неслучайному номинальному значению  $R_0$ . При дальнейшей эксплуатации объекта РОП случайно изменяется, что можно представить полюсной случайной функцией времени  $R(t)$ , все реализации которой проходят через одну неслучайную точку - "полюс" ( $R_0, t_{01}$ ).

При очередном техническом обслуживании в момент времени  $t_{02}$  у всех  $j = \overline{1, n}$  эксплуатируемых объектов опять устанавливается начальное значение параметра  $R_0$  и случайный процесс разрегулирования повторяется вновь (см. рис.).



Рассмотренный процесс разрегулирования аппроксимируется известной верной функцией с нулевым начальным рассеиванием

$$R(t) = R_0 + Qt \quad (29)$$

где  $Q$  - случайная скорость разрегулирования;  $t$  - время, отсчитываемое от момента проведения  $t_{0j}$  последнего технического обслуживания.

Линеаризация процесса разрегулирования осуществляется таким же образом, как и линеаризация процесса износа. Для определения оценок характеристик  $m_q$  и  $S_q$ , описывающих процесс разрегулирования, необходимо хотя бы в один момент времени измерить значение РОП  $j = \overline{1, n}$  однотипных объектов. Кроме того, необходимо знать момент

проведения ( $t_0$ ) и результат ( $R_0$ ) предыдущей регулировки при техническом обслуживании. Отметим, что на номинальные значения РОП  $R_0$  в большинстве своем устанавливаются допуски

$$R_0 \in (R_{0min}; R_{0max}),$$

поэтому начальные значения  $R_0$  при  $i$ -х регулировках могут отличаться в пределах допусков.

Как свидетельствует практика, значения случайной скорости изменения РОП ограничены нижним  $q_H$  и верхним  $q_B$  пределами:

$$Q \in (q_H; q_B), \text{ при } q_H; q_B > 0.$$

В этом случае аргумент  $Q$  модели (29) будет иметь усеченное нормальное распределение, плотность которого имеет вид

$$f(Q) = cf(q) = \frac{c}{S_q \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{(Q - m_q)^2}{2S_q^2}\right\}, \quad (30)$$

где  $f(q)$  - плотность нормального распределения (неусеченного),  $c$  - нормирующий множитель, определяемый из условия, чтобы площадь под кривой плотности распределения была равна единице.

Плотность распределения времени достижения РОП значения  $R_n$  при усеченном нормальном распределении (30) скорости  $Q$  с использованием (14) имеет вид, аналогичный (15):

$$f(t) = f[R(t)] = \frac{c\beta}{t^2 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\beta}{t} - \alpha\right)^2\right], \quad (36)$$

при  $t_1 \leq t \leq t_2$ , где

$$t_1 = \frac{R_{\Pi} - R_0}{q_B}; \quad t_2 = \frac{R_{\Pi} - R_0}{q_H}, \quad (37)$$

являются границами изменения времени  $T = \{t\}$  выхода РОП за значение  $R_n$  при возможных пределах изменения скорости  $Q$ .

Идентичность рассматриваемой модели в принятой постановке с моделью оценки времени работоспособности позволяет определить время сохранения работоспособности  $t_c = t_p$  как интервал от момента последней регулировки РОП (принято  $t_{0i} = 0$ ) до потери работоспособности. Оценив значение  $t_p$ , можно установить оптимальный, с точки зрения надежности, период технического обслуживания, связанный с регулировкой РОП. Безусловно, это лишь один аспект назначения сроков проведения профилактических работ для исследуемых объектов, поскольку на практике необходимо учитывать еще целый ряд факторов: организационных, экономических и пр.

При существующем техническом обслуживании, ориентированном на календарное время, измеряя в момент проведения профилактической работы значения РОП однотипных объектов, можно проверить, не превышает ли установленный период времени  $t_{пр}$  до следующей регулировки расчетного значения  $t_p$ . Если это имеет место, то следует ограничить период  $t_{пр}$  (принять  $t_{пр} = t_p$ ).

### 4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2.	Автоматизированный логико-вероятностный расчет надежности параллельно последовательных структур технических систем	3	Работа в малых группах (1)
2	2.	Автоматизированный логико-вероятностный расчет надежности мостиковых структур технических систем	3	Работа в малых группах (1)
3	3.	Автоматизированный логико-вероятностный расчет надежности типовых структур технических систем	3	Работа в малых группах (1)
4	3.	Автоматизированный логико-вероятностный расчет надежности технических систем с комбинированной структурой	3	Работа в малых группах (1)
<b>ИТОГО</b>			<b>12</b>	<b>4</b>

### 4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование практической работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2.	Интерполяция в системе Matlab	6	Работа в малых группах (1)
2	3.	Определение динамических характеристик автоматического управления.	3	Работа в малых группах (1)
3	3.	Анализ и синтез автоматического управления	3	Работа в малых группах (2)
<b>ИТОГО</b>			<b>12</b>	<b>4</b>

### 4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрено.

**5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>		<i>Σ комп.</i>	<i>t<sub>ср</sub> час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
			<i>ПК</i>					
			<i>1</i>	<i>2</i>				
<b>1</b>		<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
1. Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности.		30	+	+	2	15	Лк, СРС	зачет
2. Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием.		39	+	+	2	19,5	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	зачет
3. Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказов.		39	+	+	2	19,5	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	зачет
<i>всего часов</i>		<b>108</b>	<b>54</b>	<b>54</b>	<b>2</b>	<b>54</b>		

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Глущенко, П.В. Техническая диагностика. Моделирование в диагностировании и прогнозировании состояния технических объектов: учебное пособие / П.В. Глущенко. – Москва : Вузовская книга, 2004. – 247 с.
2. Лузгин, В.В. Методы идентификации и диагностики промышленных объектов : монография / В.В. Лузгин, А.Д. Ульянов. – Братск : БрГУ, 2017. – 146 с.
3. Алексеев, А.А. Идентификация и диагностика систем : учебник / А.А. Алексеев, Ю.А. Короблев, М.Ю. Шестопапов. – Москва : Академия, 2009. – 352 с.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
<b>Основная литература</b>				
1	Гологорский, Е. Г. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии : учебник / Е. Г. Гологорский, А. И. Доценко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : БАСТЕТ, 2016. - 504 с. - (Высшее профессиональное образование: бакалавриат, специалитет).	Лк, ПЗ, ЛР	22	1
2	Малкин, В.С. Техническая диагностика [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.С. Малкин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 272 с. — Режим доступа: <a href="https://e.lanbook.com/book/64334">https://e.lanbook.com/book/64334</a> .	Лк, ПЗ, ЛР	ЭР	1
<b>Дополнительная литература</b>				
3	Диагностирование гидроцилиндров подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин по параметрам несущей способности : методические указания / Д. Ю. Кобзов [и др.]. - Братск : БрГУ, 2009. - 24 с.	ПЗ, ЛР	65	1

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ  
[http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r\\_15/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=](http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=).
2. Электронная библиотека БрГУ  
<http://ecat.brstu.ru/catalog>.
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»  
<http://biblioclub.ru>.
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»  
<http://e.lanbook.com>.
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"  
<http://window.edu.ru>.

6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ) <https://uisrussia.msu.ru/> .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ <http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/> .

## **9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/практическим работам**

Даются рекомендации при подготовке к лабораторным и практическим работам.

#### **Лабораторная работа №1**

#### **Автоматизированный логико - вероятностный расчет надежности параллельно последовательных структур технических систем**

##### **Цель работы:**

Изучить методику автоматизированного логико-вероятностного расчета надёжности для различных параллельно-последовательных структур. Определить результирующий вероятность безотказной работы и другие показатели безотказности по заданной структурной схеме.

##### **Задание:**

1. С помощью ПК подсчитать результирующие вбр для каждой выделенной элементарной ППС,
2. Построить эквивалентную структурную схему надежности на втором уровне и выделить снова элементарные ППС, для которых также подобрать соответствующие варианты; Если бы структурная схема расчета надежности ТС содержала большее количество элементов, то повторить пп.1 и 2 до тех пор, пока не останется один эквивалентный элемент, надежность которого соответствует надежности всей ТС;
3. Используя приведенные соотношения для показателей безотказности при постоянной интенсивности отказов, вычислить за определенное время  $t = 100 \cdot N$ , остальные показатели надежности: вероятность отказов; частоту отказов; интенсивность отказов и среднюю наработку на отказ.
4. Проанализировать уровень полученной результирующей надежности ТС и предложить возможные варианты ее повышения.

##### **Порядок выполнения:**

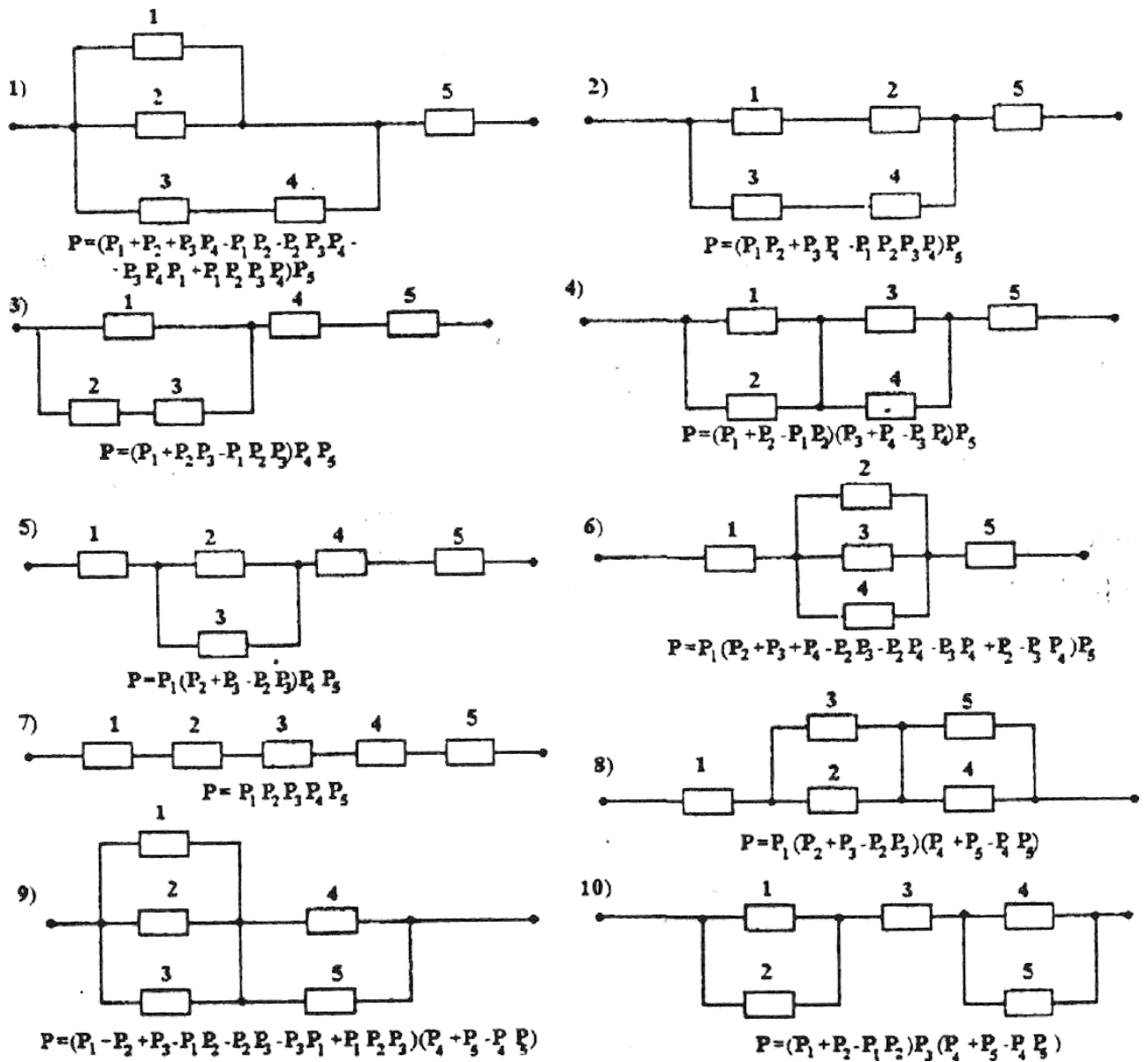
1. Зарисовать структурную схему надежности ТС в соответствии с рисунком, общую для всех вариантов, произвести разбивку на элементарные ППС, выделив их пунктирной линией, и пронумеровать;
2. Подобрать по рисунку соответствующие варианты для выделенных элементарных ППС;
3. Исходные данные для каждого варианта найти, используя следующие условные соотношения:

$$P_i (i = 1, 2, \dots, 20) = (0,60 + i/100) + 10^{-3} \cdot N;$$

$$\Delta P_i (i = 1, 2, \dots, 20) = 10^{-5} \cdot i \cdot N,$$

где  $N$  – номер варианта соответствующий двум последним цифрам номера зачетки;

$i$  - номер элемента в структурной схеме надежности ТС.



Структурные схемы надежности элементарных ППС

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Гологорский, Е. Г. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии : учебник / Е. Г. Гологорский, А. И. Доценко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : БАСТЕТ, 2016. - 504 с. - (Высшее профессиональное образование: бакалавриат, специалитет).

2. Малкин, В.С. Техническая диагностика [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.С. Малкин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 272 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/64334>.

Дополнительная литература

1. Диагностирование гидроцилиндров подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин по параметрам несущей способности : методические указания / Д. Ю. Кобзов [и др.]. - Братск : БрГУ, 2009. - 24 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Какие показатели надежности ТС Вам известны?
- 2 Содержание функциональных операторов, входящих в алгоритм ЛВР надежности ТС?
- 3 Понятие о надежности ТС и о ППС. Что понимается под элементарной ППС?
- 4 Расскажите о постановке задачи автоматизированного ЛВР надежности ППС.
- 5 Выведите выражение для определения результирующей вбр элементарной ППС  $i$ -го варианта.
- 6 Содержание алгоритма автоматизированного ЛВР надежности ППС.
- 7 Поясните схему алгоритма программы NADP.
- 8 Как проверить правильность работы программы?

**Лабораторная работа №2**

**Автоматизированный логико-вероятностный расчет надежности мостиковых структур технических систем**

Цель работы:

Изучить методику автоматизированного ЛВР надежности мостиковых структур. Определить результирующие показатели надежности по заданной структурной схеме с мостиковыми структурами.

Задание:

Дана или самостоятельно составлена структурная схема надежности сложной ТС. Структурная схема надежности соответственно состоит из большого количества элементов с известными исходными значениями вбр и набора элементарных мостиковых структур.

Требуется формализовать с использованием ЭВМ нахождение результирующей структурной надежности такой ТС, т.е. обеспечить ее нахождение в автоматизированном режиме. Соответственно такой ЛВР надежности назовём автоматизированным и для его реализации необходимо составить алгоритм и программу.

Порядок выполнения:

- 1 Разбить заданную структурную схему ТС на ряд элементарных мостиковых структур и их пронумеровать.
- 2 Последовательно подобрать для каждой выделенной элементарной мостиковой структуры целесообразный метод ЛВР надежности.
- 3 Ввести в ЭВМ известные вбр всех пяти элементов  $P_i$  для каждой элементарной мостиковой структуры, а также соответствующий шаг изменения вбр этих элементов  $\Delta P_i$ . Кроме того, последовательно вводить в ЭВМ номер варианта, соответствующий выбранному методу ЛВР надежности.
- 4 Считывать с дисплея ЭВМ значения результирующей вбр для каждой элементарной мостиковой структуры, например, минимальные, средние и максимальные значения.
- 5 Составить эквивалентную структурную схему расчета надежности.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта



## 5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе/ семинару/ практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

### Основная литература

1. Гологорский, Е. Г. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии : учебник / Е. Г. Гологорский, А. И. Доценко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : БАСТЕТ, 2016. - 504 с. - (Высшее профессиональное образование: бакалавриат, специалитет).
2. Малкин, В.С. Техническая диагностика [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.С. Малкин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 272 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/64334>.

### Дополнительная литература

1. Диагностирование гидроцилиндров подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин по параметрам несущей способности : методические указания / Д. Ю. Кобзов [и др.]. - Братск : БрГУ, 2009. - 24 с.

### Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Назовите количественные показатели безотказности ТС.
- 2 Понятие о надежности ТС и о элементарной мостиковой структуре.
- 3 Сущность метода разложения по базовому элементу.
- 4 Понятие о методе преобразования узлов сложной конфигурации.
- 5 Расскажите о ЛВР надежности мостиковых структур преобразованием: а) треугольника элементов в звезду; б) звезды элементов в треугольник.
- 6 Постановка задачи автоматизированного ЛВР надежности мостиковых структур.
- 7 Содержание алгоритма автоматизированного ЛВР надежности мостиковых структур.
- 8 Поясните схему программы NADM.
- 9 Как оценить правильность работы программы?

### **Лабораторная работа №3**

**Автоматизированный логико-вероятностный расчет надежности типовых структур технических систем.**

Цель работы:

Изучить методику автоматизированного ЛВР надежности типовых структур. Определить результирующие показатели надежности по заданной структурной схеме, содержащей разнообразные типовые структуры.

Задание:

Дана или самостоятельно составлена структурная схема надежности, состоящая из большого количества элементов надежности с известными исходными значениями вор. Группировка элементов расчета надежности структурной схемы приводит к различным типовым структурам.

Требуется формализовать с использованием ЭВМ нахождение результирующей надежности ТС, т.е. обеспечить ее нахождение в автоматизированном режиме. Такой ЛВР надежности типовых структур назовем автоматизированным и для его реализации составим алгоритм и программу.

Порядок выполнения:

- 1 Разбить заданную структурную схему на ряд типовых структур, их выделить и

пронумеровать.

2 Последовательно подобрать для каждой выделенной типовой структуры номер варианта.

3 Ввести в ЭВМ исходные значения вбр  $P_i$  пяти или шести элементов для каждой типовой структуры, а также соответствующий шаг изменения вбр  $\Delta P_i$  этих элементов. Затем ввести в ЭВМ и номер варианта, соответствующий типу очередной выделенной типовой структуры.

4 Считывать с дисплея ЭВМ значения результирующей вбр для каждой типовой структуры, например, минимальные, средние и максимальные значения.

5 Составить эквивалентную структурную схему надежности, исходные значения вбр элементов в которой взять согласно п. 3.4.4 данного алгоритма.

6 Проанализировать полученный результат в случае, если остался один эквивалентный элемент, или повторять пп. 3.4.1 - 3.4.5 до тех пор, пока не будет найдена искомая результирующая надежность всей схемы.

#### Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

#### Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

#### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в втором разделе данной дисциплины.

#### Основная литература

1. Гологорский, Е. Г. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии : учебник / Е. Г. Гологорский, А. И. Доценко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : БАСТЕТ, 2016. - 504 с. - (Высшее профессиональное образование: бакалавриат, специалитет).
2. Малкин, В.С. Техническая диагностика [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.С. Малкин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 272 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/64334>.

#### Дополнительная литература

1. Диагностирование гидроцилиндров подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин по параметрам несущей способности : методические указания / Д. Ю. Кобзов [и др.]. - Братск : БрГУ, 2009. - 24 с.

#### Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Назовите типовые структуры.
- 2 Выведите выражение для определения результирующей вбр  $i$ -го варианта.
- 3 Расскажите о постановке задачи автоматизированного ЛВР надежности типовых структур.
- 4 Содержание алгоритма автоматизированного ЛВР надежности типовых структур.
- 5 Поясните схему программы NADT. Как оценить правильность ее работы?
- 6 Перечислите возможные способы повышения надежности заданной структуры.
- 7 Назовите показатели безотказности систем.

#### Лабораторная работа №4

**Автоматизированный логико-вероятностный расчет надежности технических систем с комбинированной структурой.**

Цель работы:

Изучить методику автоматизированного логико-вероятностного расчета надежности систем управления с комбинированной структурой. Научиться составлять структурные схемы расчета надежности, определять результирующие показатели безотказности и анализировать их изменения.

Задание:

По функциональной схеме автоматизации составляется структурная схема расчета надежности исследуемой системы, состоящая, как правило, из большого количества элементов расчета надежности с известными значениями вбр. Необходимо получить результирующие показатели безотказности в автоматизированном режиме.

Порядок выполнения:

1 Разбить общую структуру системы на элементарные структуры, состоящие из 5-6 элементов с учетом реальных инженерных соображений;

2 Распознать тип каждой выделенной элементарной структуры из числа параллельно - последовательных, мостиковых или типовых структур;

3 Свернуть каждую элементарную структуру с получением результирующей вбр;

4 Составить новую эквивалентную структурную схему, в качестве элементов которой выступают выделенные ранее элементарные структуры;

5 Затем по аналогии все повторить на следующем уровне и так сворачивать до тех пор, пока не будет найдена результирующая вероятность безотказной работы всей системы управления.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Гологорский, Е. Г. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии : учебник / Е. Г. Гологорский, А. И. Доценко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : БАСТЕТ, 2016. - 504 с. - (Высшее профессиональное образование: бакалавриат, специалитет).
2. Малкин, В.С. Техническая диагностика [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.С. Малкин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 272 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/64334>.

Дополнительная литература

1. Диагностирование гидроцилиндров подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин по параметрам несущей способности : методические указания / Д. Ю. Кобзов [и др.]. - Братск : БрГУ, 2009. - 24 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Содержание алгоритма автоматизированного ЛВР надежности ТС.
- 2 Понятие о надежности ТС и методах ее повышения.
- 3 Как составляют структурную схему расчета надежности?
- 4 Поясните схему диалогового взаимодействия с ЭВМ в процессе автоматизированного ЛВР

надежности ТС.

5 Поясните схему программы NADSU

6 Как оценить правильность работы программы?

### **Практическое занятие №1** **Интерполяция в системе Matlab**

Цель работы:

Получить аналитическое выражение функциональной зависимости от аргумента, заданного аналитически или графиком.

Задание:

1. Познакомиться с основными методами интерполяции в среде MatLab

Порядок выполнения:

Из приложений выбрать табличные значения или получить из графиков и решить задачу интерполяции одним из методов. Получить результат и составить отчет.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы
2. Задание
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
4. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

#### Основная литература

1. Гологорский, Е. Г. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии : учебник / Е. Г. Гологорский, А. И. Доценко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : БАСТЕТ, 2016. - 504 с. - (Высшее профессиональное образование: бакалавриат, специалитет).
2. Малкин, В.С. Техническая диагностика [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.С. Малкин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 272 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/64334>.

#### Дополнительная литература

1. Диагностирование гидроцилиндров подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин по параметрам несущей способности : методические указания / Д. Ю. Кобзов [и др.]. - Братск : БрГУ, 2009. - 24 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое интерполяция?
2. Какое применение может иметь интерполяция в АСУТП?
3. Из каких действий состоит компьютерная технология интерполяции?
4. Когда можно применять полиномиальную интерполяцию?

### **Практическое занятие №2**

#### **Определение динамических характеристик автоматического управления.**

Цель работы:

Определить динамические характеристики объекта управления.

Задание:

Динамические характеристики снимались по каналу давления на линии, которое регулировалось путём изменения хода регулирующего органа.

Измерения производили путём перемещения РО в процентном соотношении.

Порядок выполнения:

1. Отображение анализируемых данных в графическом виде.
2. Построение кривой для рассматриваемой зависимости.
3. Анализ полученной кривой для рассматриваемой зависимости.
4. Выводы о проделанной работе.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы
2. Задание
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
4. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

#### Основная литература

1. Гологорский, Е. Г. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии : учебник / Е. Г. Гологорский, А. И. Доценко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : БАСТЕТ, 2016. - 504 с. - (Высшее профессиональное образование: бакалавриат, специалитет).
2. Малкин, В.С. Техническая диагностика [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.С. Малкин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 272 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/64334>.

#### Дополнительная литература

1. Диагностирование гидроцилиндров подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин по параметрам несущей способности : методические указания / Д. Ю. Кобзов [и др.]. - Братск : БрГУ, 2009. - 24 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое динамические характеристики объекта управления?
2. Как определяется правильность получения динамических характеристик?

### **Практическое занятие №3**

#### **Анализ и синтез автоматического управления.**

Цель работы:

Изучения условий эксплуатации уже построенных систем автоматического управления, так как только на основании такого изучения можно правильно сформулировать количественные оценки, которые могут быть использованы в практике проектирования и расчета новых систем.

Задание:

В качестве объекта исследования выступают линейные (линеаризованные) динамические стационарные системы управления с одним входом и одним выходом. При этом модель одномерной САУ задана в виде комплексной передаточной функции, записанной как отношение полиномов

Порядок выполнения:

1. Получить передаточную функцию разомкнутой системы.
2. Получить передаточную функцию замкнутой системы.
3. Определить полюса и нули передаточных функций.
4. Построить графики переходной функции.
5. Построить логарифмические частотные характеристики.
6. Построить частотный годограф Найквиста.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы
2. Задание
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
4. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Гологорский, Е. Г. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии : учебник / Е. Г. Гологорский, А. И. Доценко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : БАСТЕТ, 2016. - 504 с. - (Высшее профессиональное образование: бакалавриат, специалитет).
2. Малкин, В.С. Техническая диагностика [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.С. Малкин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 272 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/64334>.

Дополнительная литература

1. Диагностирование гидроцилиндров подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин по параметрам несущей способности : методические указания / Д. Ю. Кобзов [и др.]. - Братск : БрГУ, 2009. - 24 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Получить передаточную функцию разомкнутой системы
2. Получить передаточную функцию замкнутой системы.
3. Определить полюса и нули передаточных функций.
4. Построить графики переходных функций.
5. Построить логарифмические частотные характеристики.
6. Построить частотный годограф Найквиста для функций.

**9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата**

Учебным планом не предусмотрено

**10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) – преподаватель использует для:

- получения информации при подготовке к занятиям,
- создания презентационного сопровождения лекций;

- интерактивного общения;
- ОС Windows 7 Professional;
- Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level ;
- Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security

**11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ  
ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР или ПЗ</i>
<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
ЛР	Лекционный кабинет/дисплейный класс	Персональные компьютеры	ЛР 1-4
ПЗ	Лекционный кабинет/дисплейный класс	Персональные компьютеры	ПЗ 1-3
СР	ЧЗЗ	-	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ПК-1	Способность выполнять эксперименты на действующих объектах по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением современных информационных	1. Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности.	1.1 Основные понятия надежности.	Вопрос к зачету 1.1
		2. Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием.	2.1. Математические модели теории надежности	Вопрос к зачету 2.1
		3. Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказах.	2.3. Системы с резервированием.	Вопрос к зачету 2.3
			3.1. Надежность основной системы.	Вопрос к зачету 3.1
			3.3. Надежность объектов при постепенных отказах.	Вопрос к зачету 3.3
ПК-2	Способность проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления	1. Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности.	1.2 Количественные показатели надежности.	Вопрос к зачету 1.2
		2. Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием.	2.2. Нормальный закон распределения наработки до отказа.	Вопрос к зачету 2.2
		3. Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказах..	3.2. Надежность восстанавливаемых объектов и систем	Вопрос к зачету 3.2



## 2. Вопросы к зачету

№ п/п	Компетенции		Вопросы к зачету	№ и наименование раздела (
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1	ПК-1	Способность выполнять эксперименты на действующих объектах по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением современных информационных	1.1 Основные понятия надежности.	1. Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности.
			2.1. Математические модели теории надежности	2. Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием.
			2.3. Системы с резервированием.	
			3.1 Надежность основной системы.	3. Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказов..
2	ПК-2	Способность проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления	1.2 Количественные показатели надежности.	1. Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности.
			2.2. Нормальный закон распределения наработки до отказа.	2. Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием.
			3.2 Надежность восстанавливаемых объектов и систем	3. Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказов..

## 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p><b>Знать</b> (ПК-1):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Основные принципы и методы построения и исследования математических моделей систем управления и преобразования для целей управлений;</li> </ul> <p>(ПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Базовое устройство персонального компьютера.</li> </ul> <p><b>Уметь</b> (ПК-1):</p>	зачтено	Студент должен во время ответа показать знания: различных методов диагностирования и идентификации, основных терминов используемых в научно-технической литературе по диагностике. Студент должен иметь навыки владения : использования универсальных программных продуктов на ПК, понимания материала и способности высказывания мыслей на научно-техническом языке. Студен во время ответа должен продемонстрировать

<p>- Использовать инструментальные программные средства в процессе разработки и эксплуатации технических систем; (ПК-2):</p> <p>- Использовать персональный компьютер для самостоятельной работы.</p> <p><b>Владеть</b> (ПК-1):</p> <p>- Навыками работы с современными аппаратными и программными средствами исследования и проектирования систем управления; (ПК -2):</p> <p>- Достаточным уровнем использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.</p>	<p><b>не зачтено</b></p>	<p>умения: использования навыков анализа основных понятий в теории автоматических систем</p> <p>Студент должен во время ответа не показал знания: различных методов диагностирования и идентификации, основных терминов используемых в научно-технической литературе по диагностике. Студент не продемонстрировал навыки владения : использования универсальных программных продуктов на ПК, понимания материала и способности высказывания мыслей на научно-техническом языке. Студен во время ответа не продемонстрировал умения: использования навыков анализа основных понятий в теории автоматических систем</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

#### 4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Надежность и диагностика систем управления направлена на ознакомление с различными методами надежности и диагностики, и их практическим применением в современных технических системах; на получение теоретических знаний и практических навыков использования различных систем диагностирования, и их дальнейшего использования в практической деятельности.

Изучение дисциплины системы управления базами данных предусматривает:

- лекции,
- лабораторные работы,
- практические занятия,
- самостоятельную работу студента,
- зачет,

В ходе освоения раздела 1 «Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности» студенты должны изучить: основные понятия надежности и количественные показатели надежности.

В ходе освоения раздела 2 «Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием.» студенты должны изучить: математические модели теории надежности, нормальный закон распределения наработки до отказа и системы с резервированием.

В ходе освоения раздела 3 «Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказах..» студенты должны изучить: надежность основной системы, надежность восстанавливаемых объектов и систем, надежность объектов при постепенных отказах.

В процессе проведения лабораторных работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков реализации представления о работе с системами идентификации и диагностирования.

В процессе проведения практических работ происходит закрепление знаний,

формирование умений и навыков проектирования различных систем идентификации и диагностирования.

При подготовке к зачету рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам: идентификация объекта управления методом регрессионного анализа, классификацию отказов.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

**АННОТАЦИЯ**  
**рабочей программы дисциплины**  
**Диагностика и надежность систем управления**

**1. Цель и задачи дисциплины**

Целью изучения данной дисциплины является овладение знаниями основных вопросов диагностики и теории надежности в современной технике, методами расчета надежности на стадиях проектирования, производства и эксплуатации объектов на примерах систем управления.

Задачей изучения дисциплины является:

- Освоение диагностики систем управления,
- Изучение методов повышения и расчета параметрической и структурной надежности систем управления.

**2. Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк – 24 часов, ЛР – 12 часов, ПЗ – 12 часов, СРС – 60 часов. Общая трудоемкость дисциплины составляет 108 часов, 3 зачетных единиц

2.2 Основные разделы дисциплины:

- 1.- Основные понятия надежности. Количественные показатели надежности.
- 2.- Математические модели теории надежности. Нормальный закон распределения наработки до отказа. Системы с резервированием
- 3.- Надежность основной системы. Надежность восстанавливаемых объектов и систем. Надежность объектов при постепенных отказах.

**3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующей компетенции:

ПК-1 - Способность выполнять эксперименты на действующих объектах по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением современных информационных

ПК-2 – Способность проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления.

**4. Вид промежуточной аттестации:** зачет

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе  
на 20\_\_-20\_\_ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.,  
(разработчик)

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)