

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

---

**ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**В.В. Пеленко, А.А. Верхованцев, А.М. Хлыновский**

**Надежность источников и систем  
теплоэнергоснабжения промышленных  
предприятий**

**Часть 1. Основы теории**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2020**

УДК 620.19 (075)  
ББК 31.38я7  
П246

**Пеленко В. В., Верхованцев А. А., Хлыновский А. М.**

Надежность источников и систем теплоэнергоснабжения промышленных предприятий. Часть 1. Основы теории: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2020. - 101 с.: ил. 28. - ISBN 978-5-91646-247-0

Учебное пособие подготовлено в соответствии с учебным планом и рабочей программой дисциплины «Надежность источников и систем теплоэнергоснабжения промышленных предприятий» для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль: «Промышленная теплоэнергетика»).

В пособии рассматриваются основные понятия и определения теории надежности, физическая сущность и закономерности изменения технического состояния теплоэнергетического оборудования; факторы, определяющие интенсивность накопления повреждений; методы получения и анализа информации об отказах и неисправностях.

Пособие может быть полезно для магистров направления 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профили: «Технология производства электрической и тепловой энергии», «Тепломассообменные процессы и установки»), а также для аспирантов и инженерно-технических работников предприятий теплоэнергетического комплекса.

Рецензенты:

директор мегафакультета биотехнологий  
и низкотемпературных систем НИУ ИТМО, д-р техн. наук,  
профессор И.В. Баранов;  
доцент кафедры автоматизированного электропривода и  
электротехники СПбГУПТД, канд. техн. наук, доцент  
В.П. Иваненко.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

ISBN 978-5-91646-247-0

©Высшая школа технологии  
и энергетики СПбГУПТД, 2020  
©Пеленко В.В., Верхованцев А.А.,  
Хлыновский А. М., 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

ТЕМА 1. Основные понятия теории надежности теплоэнергетического оборудования.....	6
1.1. Определение надежности теплоэнергетических установок.....	6
1.2. Составляющие понятия теории надежности.....	8
ТЕМА 2. Оперативные состояния и отказы энергетических установок....	14
2.1. Оперативные состояния технических объектов.....	14
2.2. Классификация отказов элементов технических систем.....	18
ТЕМА 3. Использование теории случайных величин для описания вероятности отказов.....	29
3.1. Основные положения теории вероятностей.....	29
3.1.1. Событие, вероятность события, частота события.....	29
3.1.2. Зависимые и независимые события, условная вероятность.....	32
3.1.3. Сумма и произведение событий.....	32
3.1.4. Теорема сложения вероятностей.....	33
3.1.5. Теорема умножения вероятностей.....	34
3.1.6. Формула полной вероятности.....	35
3.1.7. Случайная величина.....	36
3.2. Особенности распределения дискретных случайных величин....	36
3.3. Характеристики распределения непрерывных случайных величин.....	39
ТЕМА 4. Основные законы распределения отказов как случайных событий.....	51
4.1. Виды математического описания случайных величин.....	51
4.2. Основные законы распределения непрерывных случайных величин.....	52
4.3. Основные законы распределения дискретных случайных величин.....	60
ТЕМА 5. Количественные показатели надежности теплоэнергетического оборудования.....	61

5.1. Базовые показатели надежности.....	61
5.2. Показатели безотказности.....	63
5.2.1. Вероятность безотказной работы. Основной закон надежности. Принцип Н. М. Седякина.....	63
5.2.2. Интенсивность отказов.....	64
5.2.3. Средняя наработка до отказа.....	67
5.2.4. Гамма-процентная наработка до отказа.....	68
5.2.5. Параметр потока отказов.....	69
5.2.6. Средняя наработка на отказ.....	72
ТЕМА 6. Характеристики ремонтпригодности и долговечности элементов технических систем.....	72
6.1. Показатели ремонтпригодности.....	72
6.1.1. Закон восстановления объекта.....	72
6.1.2. Интенсивность восстановления.....	74
6.1.3. Среднее время восстановления.....	74
6.2. Показатели долговечности.....	75
6.2.1. Закон долговечности объекта.....	76
6.2.2. Средний ресурс и средний срок службы оборудования.....	77
6.2.3. Гамма-процентные ресурс и срок службы.....	78
6.2.4. Назначенные ресурс и срок службы оборудования.....	78
6.2.5. Установленные ресурс и срок службы оборудования.....	79
6.3. Комплексные показатели надежности.....	79
6.3.1. Коэффициент готовности объекта.....	79
6.3.2. Коэффициент оперативной готовности.....	81
6.3.3. Коэффициент технического использования объекта.....	81
ТЕМА 7. Резервирование технических систем. Общие методы обеспечения надёжности сложных систем .....	83
7.1. Основные понятия резервирования.....	83
7.2. Типовые структуры расчета надёжности.....	87

7.2.1. Расчёт надёжности, основанный на использовании параллельно-последовательных структур.....	88
7.2.2. Включение резервного оборудования системы замещением.....	89
7.3. Методы обеспечения надёжности сложных систем.....	90
7.3.1. Конструктивные способы обеспечения надёжности.....	90
7.3.2. Технологические способы обеспечения надёжности технических изделий в процессе изготовления.....	91
7.3.3. Обеспечение надёжности технических систем в условиях эксплуатации.....	92
7.3.4. Дополнительные пути повышения надёжности сложных технических систем при эксплуатации.....	94
7.3.5. Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надёжности техники при эксплуатации.....	95
ВЫВОДЫ.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	99
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	100

## **ТЕМА 1. Основные понятия теории надежности теплоэнергетического оборудования**

### **1.1. Определение надежности теплоэнергетических установок**

Характерной отличительной особенностью теплоэнергетического оборудования, тепловых и электрических станций от производственных предприятий других отраслей промышленности является требование обеспечения непрерывного баланса «выработка тепловой и электрической энергии – и их потребление». Это условие должно выполняться независимо от времени суток, дней недели, сезонных колебаний спроса на вырабатываемую продукцию, нестабильности качества поставляемого на электростанцию топлива и т.д.

Поскольку выработка электроэнергии впрок и ее складирование невозможно, то непредусмотренный заранее отказ в работе оборудования электростанции кроме затрат на восстановление этого оборудования может привести к существенному ущербу у потребителей электроэнергии, вызвать катастрофические ситуации на производствах с непрерывным режимом работы, создать аварийные ситуации на транспорте, в связи, значительно затруднить работу коммунальных служб. Поэтому основной задачей электростанций и энергосистем является обеспечение бесперебойного энергоснабжения потребителей. Эта задача может быть решена только при исправном состоянии и надежной работе оборудования.

*Надежность* является важнейшей технической характеристикой качества объекта. **Надежность как свойство изделий оценивается вероятностными характеристиками, основанными на статистической обработке экспериментальных данных.** Однако вероятностные методы определения показателей надежности позволяют вполне определенно и достаточно хорошо оценивать надежность работы машин и других технических изделий. По мере технического прогресса наблюдается усложнение технических изделий. Основное противоречие в развитии современной техники заключается в том, что если не предпринимать

необходимые меры по повышению надежности, то чем сложнее, быстрее и точнее работа техники, тем менее она надежна. Отсюда следует, что решение проблемы надежности является не только важной технической, но и большой экономической задачей.

Сложность получения количественной оценки надежности исследуемого изделия состоит в том, что это свойство изделий обычно направлено в их будущее существование, т.е. оно «развернуто во времени» предстоящей эксплуатации, условия которой разнообразны и мало предсказуемы. Иначе говоря, характеристики надежности носят по отношению к каждому конкретному изделию вероятностный, прогнозный характер.

Как известно, ГОСТ 27.002-83 «Надежность в технике. Термины и определения» определяет **надежность** технического объекта как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Более поздняя редакция ГОСТ Р 53480-2009 определяет надежность как свойство **готовности** и влияющие на него свойства **безотказности** и **ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания**.

**Готовность** – способность объекта выполнять требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены. Эта способность зависит от сочетания свойств безотказности, ремонтпригодности и поддержки технического обслуживания. Термин «Данные условия» может включать климатические, технические или экономические обстоятельства. Необходимые внешние ресурсы, кроме ресурсов технического обслуживания, не влияют на свойства готовности.

Для электростанции понятие надежности можно сформулировать более конкретно. **Надежность ТЭС** – это свойство сохранять во времени способность вырабатывать электрическую и тепловую энергию

определенных параметров по требуемому графику нагрузки при заданной системе технического обслуживания и ремонтов оборудования.

## 1.2. Составляющие понятия теории надежности

Определение понятия надежность в ГОСТ 27.002-83, ГОСТ Р 53480-2009, ГОСТ 27.002-2015 и других, более поздних руководящих документах, содержит примечание: **Надежность** является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетаний следующих свойств:

- безотказности;
- долговечности;
- ремонтпригодности;
- сохраняемости.

**Безотказность** – это свойство объекта непрерывно сохранять свою работоспособность в течение заданного времени. В новом ГОСТе безотказность – способность объекта выполнять требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях.

**Долговечность** – это свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. По новому ГОСТу долговечность – способность объекта выполнять требуемую функцию до достижения предельного состояния при данных условиях использования и технического обслуживания.

**Ремонтпригодность** – это свойство объекта, заключающееся в приспособлении, во-первых, к предупреждению и обнаружению причин отказов путем контроля исправности составляющих элементов и систем и, во-вторых, к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов оборудования. Для обеспечения ремонтпригодности объекта необходимо наличие эффективной диагностики состояния объекта и проведение качественных



технического обслуживания и ремонтов. В новой редакции ремонтпригодность – это способность объекта при данных условиях использования и технического обслуживания к поддержанию или восстановлению состояния, при котором оно может выполнять требуемую функцию.

В зависимости от возможности дальнейшего применения объекта, изделия классифицируются на восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

Восстанавливаемое изделие – изделие, которое может быть восстановлено потребителем, т.е. изделие, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Невосстанавливаемое изделие – изделие, которое не может быть восстановлено потребителем и подлежит замене.

Ремонтируемый объект – объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

Неремонтируемый объект – объект, ремонт которого невозможен или не предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

**Сохраняемость** – это свойство объекта сохранять значения безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение или после хранения и транспортировки. **В новой редакции** сохраняемость – способность объекта выполнять требуемую функцию в течение и после хранения или транспортирования.

В каждом конкретном случае оценки или задания надежности изделия следует пользоваться теми сторонами и видами надежности, которые необходимы для характеристик надежности объекта с учетом его целевого назначения.

В прикладной теории надежности в понятие надежности могут включаться дополнительные свойства. Так, для характеристики надежности объектов, являющихся потенциальным источником опасности, используются свойства **безопасности, живучести и устойчивости**.

**Безопасность** – свойство, в случае нарушения работоспособного состояния, не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды.

**Живучесть** – свойство объекта сохранять работоспособность (полностью или частично) в условиях неблагоприятных воздействий, не предусмотренных нормальными условиями эксплуатации.

**Устойчивостью** признаков качества объекта или технологического процесса называют свойства объекта или процесса сохранять точность этих признаков во времени. Особенно это касается объектов, являющихся потенциальным источником опасности, к которым следует относить и электроэнергетические объекты.

**Предельное состояние объекта** – это состояние, при котором его дальнейшее применение недопустимо по условиям безопасности либо экономически нецелесообразно, либо восстановление его работоспособного состояния технически невозможно или экономически нецелесообразно.

Предельное состояние объекта может наступить, во-первых, у работоспособной установки при недопустимом снижении показателей ее безопасности или экономической эффективности; во-вторых, у установки, находящейся в неработоспособном состоянии в результате такого отказа, после которого восстановление работоспособности объекта технически невозможно или экономически не оправдано. **В новой редакции** предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по причинам опасности, экономическим или экологическим.

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.

Именно 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.

Характерным для энергетических установок является циклический режим работы, который представлен на рис.1.1. в виде графика. После некоторой продолжительности работы установка останавливается для проведения планово-предупредительных ремонтов (ППР), при возникновении отказов во время работы проводятся неплановые ремонты (НР). В отдельных случаях период простоя установки может быть связан с модернизацией и реконструкцией ее отдельных элементов или внешними, не связанными с техническим состоянием установки, например, с выводом ее в резерв из-за снижения потребления электрической или тепловой энергии,

отсутствием средств на закупку топлива или с аварией в энергосистеме, например, с обрывом ЛЭП.

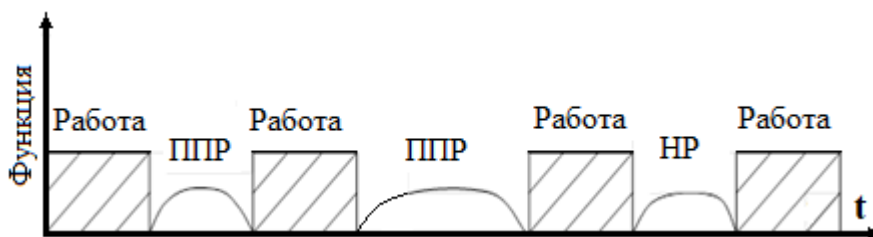


Рис.1.1. График работы ТЭС:

ППР – планово-предупредительный ремонт;

НР – неплановый ремонт

Будем считать, что нахождение энергетической установки в резерве не оказывает влияния на ее надежность. В этом случае для энергетических установок основными составляющими надежности становятся безотказность, долговечность и ремонтпригодность.

Утверждение, что данная установка надежна или ненадежна, без указания, к какой составляющей надежности оно относится, является слишком общим. Ранее понятие надежности связывалось только с одной стороной надежности – с безотказностью. Однако установка может обладать низкой безотказностью, но иметь высокую долговечность или обладать высокой безотказностью, ни иметь низкую ремонтпригодность. Обычно улучшение одного составляющего свойства надежности достигается за счет ухудшения другого. Например, безотказность установки можно существенно повысить, если часто и долго ее ремонтировать. Но это будет означать, что установка имеет низкую ремонтпригодность. Таким образом, говоря о надежности установки, будем иметь в виду все три ее составляющие: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. В противном случае будем оговаривать, о какой составляющей идет речь.

Сводный перечень показателей надежности приведен в табл. 1.1.

## Номенклатура показателей надежности

Свойство надежности	Наименование показателя	Обознач.
Единичные показатели		
Безотказность	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$
	Средняя наработка на отказ	$T_o$
	Средняя наработка до отказа	$T_{cp}$
	Средняя наработка между отказами	$T$
Долговечность	Средний ресурс	$T_p$
	Гамма-процентный ресурс	$T_{p\gamma}$
	Назначенный ресурс	$T_{p.n}$
	Установленный ресурс	$T_{p.y}$
	Средний срок службы	$T_{сл}$
	Гамма-процентный срок службы	$T_{сл\gamma}$
	Назначенный срок службы	$T_{сл.n}$
	Установленный срок службы	$T_{сл.y}$
Сохраняемость	Средний срок сохраняемости	$T_c$
	Гамма-процентный срок сохраняемости	$T_{c\gamma}$
	Назначенный срок хранения	$T_{c.n}$
	Установленный срок сохраняемости	$T_{c.y}$
Ремонтопригодность	Среднее время восстановления	$T_v$
	Вероятность восстановления	$P_v(t)$
Комплексные показатели		
Комбинация свойств	Коэффициент готовности	$K_g$
	Коэффициент технического использования	$K_{т.и}$
	Коэффициент оперативной готовности	$K_{o.g}$

## **ТЕМА 2. Оперативные состояния и отказы энергетических установок**

### **2.1. Оперативные состояния технических объектов**

Согласно ГОСТ 27.002-89 различают пять основных видов технического состояния объектов:

- 1. Исправное состояние.**
- 2. Неисправное состояние.**
- 3. Работоспособное состояние.**
- 4. Неработоспособное состояние.**
- 5. Предельное состояние.**

Схема постоянных технических состояний и событий для теплоэнергетических объектов приведена на рис.1.2.

Переход объекта (изделия) из одного вышестоящего технического состояния в нижестоящее обычно происходит вследствие событий: повреждений или отказов.

**Отказ** - это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

**Повреждение** - событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

В ГОСТ 15467-79 введено еще одно понятие, отражающее состояние объекта - дефект.

**Дефектом** называется каждое отдельное несоответствие объекта установленным нормам или требованиям. Дефект отражает состояние, отличное от отказа.

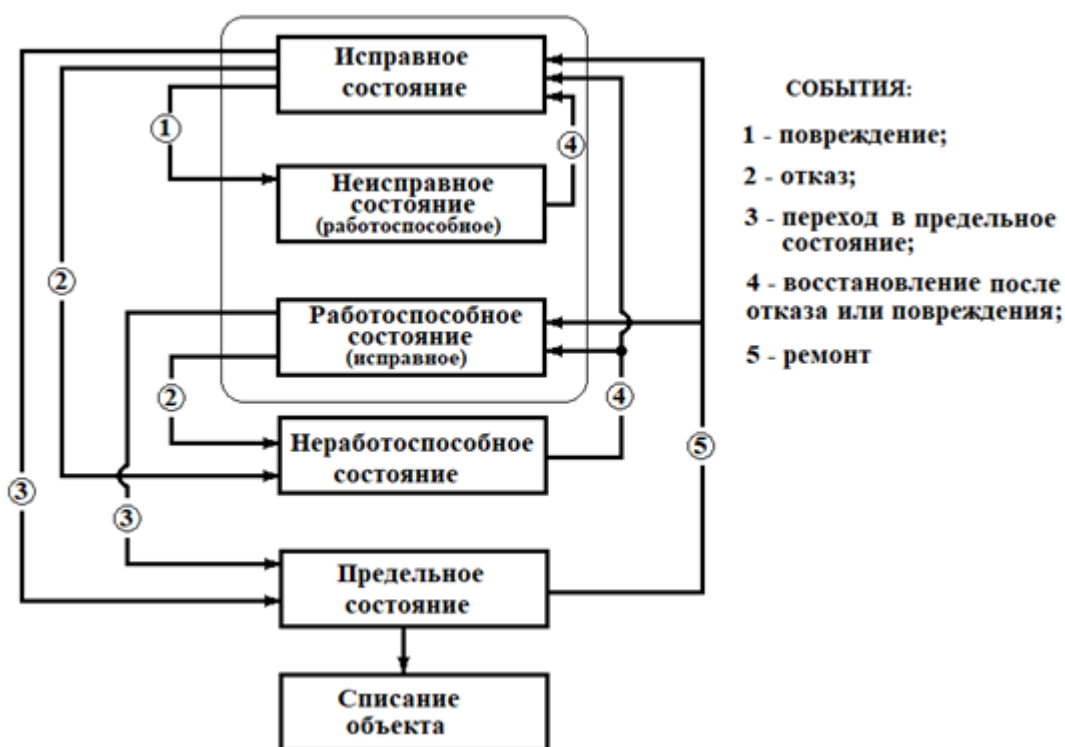


Рис.1.2. Схема постоянных технических состояний и событий технических объектов

Таким образом, с позиций теории надежности, теплоэнергетический объект может находиться в **исправном, неисправном, работоспособном и неработоспособном** состоянии.

**Исправное состояние** — это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической документации (НТД). Если же хотя бы по одному из требований изделие не соответствует НТД, то считается, что оно находится в **неисправном состоянии**.

**Работоспособное состояние** — состояние объекта, при котором он способен выполнять (или выполняет) заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных технической документацией. По ГОСТ Р 53480-2009 **работоспособное состояние** — состояние объекта, при котором он способен выполнять требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние условия.

При этом оговаривается, что объект в одно и то же время может находиться в работоспособном состоянии для некоторых функций и в неработоспособном состоянии для других функций.

Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным НТД, называется **неработоспособным**.

*Понятие «исправное состояние» шире, чем понятие «работоспособное состояние». Работоспособный объект в отличие от неисправного удовлетворяет лишь тем требованиям НТД, которые обеспечивают его нормальное функционирование. При этом он может не удовлетворять, например, требованиям, относящимся к внешнему виду изделия (содрана краска и т.д.). Работоспособный объект может быть неисправным, однако его повреждения при этом не настолько существенны, чтобы могли препятствовать функционированию объекта.*

Кроме понятия работоспособного состояния, одним из основополагающих понятий теории надежности является также понятие отказа работы объекта. *Объект переходит из работоспособного состояния в неработоспособное состояние после события, которое называют **отказом**.*

**Отказ** – это потеря способности теплоэнергетического объекта выполнять требуемую функцию.

*Понятие отказа занимает одно из центральных мест в теории надежности, поскольку **теория надежности** — это наука, изучающая закономерности появления отказов технических устройств.*

Главная цель работы энергетической установки состоит в обеспечении потребителей электрической и тепловой энергией с заданными параметрами в требуемом количестве согласно диспетчерского графика нагрузок.

При проектировании энергетической установки состав входящего в нее оборудования выбирается таким образом, чтобы в целом при заданном качестве топлива и определенных параметрах внешней среды установка



развивала бы заданную мощность. Эта мощность, или производительность называется номинальной. Сумма номинальных мощностей установленных на электростанции турбогенераторов называется установленной мощностью электростанции.

При максимальном спросе на электроэнергию, а также в случае вынужденного останова других агрегатов на электростанции и возникающем при этом дефиците электроэнергии в некоторых случаях допускаются кратковременные перегрузки котлов и турбин выше номинальной мощности.

Допустимый уровень перегрузок называется максимальной мощностью. Величина и максимальная продолжительность допустимой перегрузки определяются экспериментально и согласовываются с заводами-изготовителями оборудования.

В реальных условиях эксплуатации энергетических установок возможно ограничение их нагрузки ниже номинальной из-за изменения качества топлива, дефектов оборудования, изменения внешних условий. Значение фактической мощности, которую можно использовать в данный момент времени, называется располагаемой мощностью.

Тепловые энергетические установки допускают снижение производительности только до определенного предела, ниже которого отдельные агрегаты установки стабильно работать не могут. Эта мощность называется минимально допустимой мощностью. Она также определяется в результате испытаний и согласовывается с заводами-изготовителями.

Графики нагрузок электрической и тепловой энергии, формируемые потребителями, существенным образом изменяются в зависимости от времени суток, дней недели, месяцев. По электростанциям нагрузки распределяются диспетчерскими службами в зависимости от требуемой мощности в системе, располагаемой мощности отдельных установок электростанций и их экономичности.

Согласно правилам технической эксплуатации (ПТЭ), оборудование энергетических установок и сетей, принятых в эксплуатацию, должно находиться в одном из четырех **оперативных состояний**:

- работа;
- резерв;
- ремонт;
- консервация.

Отправка в ремонт или постановка на консервацию оформляются оперативной заявкой, подписанной главным инженером и поданной в диспетчерскую службу энергосистемы. В случае, если оборудование требуется отключить немедленно, то заявка не оформляется, но в диспетчерскую службу посылается оперативное извещение о причинах отключения и предполагаемой продолжительности ремонта поврежденного узла.

Таким образом, если соответствующие заявки не были оформлены, то предполагается, что оборудование находится в работоспособном состоянии и может нести нагрузку в пределах от минимально допустимой до максимальной. Значения этих мощностей зафиксированы в соответствующих документах электростанции и диспетчерских службах энергосистемы и министерства.

Применительно к энергетическим установкам их **работоспособность** определяется как состояние, при котором они могут нести электрическую и тепловую нагрузки с соответствующими параметрами в указанных в оперативных документах пределах.

## **2.2. Классификация отказов элементов технических систем**

Как уже отмечалось, **отказом** называется потеря работоспособности, т.е. переход в состояние, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

По характеру возникновения отказы связаны либо с поломкой отдельных элементов при функционировании, либо с изменением параметров до недопустимых пределов. Для энергетических установок отказы связаны со снижением располагаемой мощности или параметров электрической и тепловой энергии.

Для различения отказов их классифицируют. Различают классификацию отказов математическую (вероятностную) и классификацию инженерную (физическую).

По причинам отказов можно разделить отказы на **случайные** и **систематические**.

**Случайные** отказы могут быть вызваны перегрузками, дефектами материалов и изготовления, ошибками персонала, сбоями. Чаще всего проявляются в неблагоприятных условиях эксплуатации.

**Систематические** отказы возникают по причинам, вызывающим постепенное накопление повреждений (время, температура, облучение). Они выражаются в виде износа, старения, коррозии, залипания, утечки и т.д.

По характеру проявления отказы подразделяются на внезапные (мгновенные) и постепенные (накопление повреждений растянуто во времени).

**Отказы внезапные** – поломки.

**Отказы постепенные** – износ, старение.

По причинам возникновения отказы бывают конструкционные, технологические, эксплуатационные. Отказы нельзя смешивать с дефектами.

**Дефектом** называется каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным нормативной документацией. Этот термин применяем ко всем видам промышленной и непромышленной продукции.

**Полный отказ** ведет к полной потере работоспособности.

**Частичный отказ** ведет к частичной потере работоспособности.

Математическая классификация отказов:

**Постепенные отказы** развиваются во времени и связаны со старением, износом, усталостной прочностью и другими факторами изменения свойств материала.

**Внезапные отказы** – на вероятность их появления не влияет время предыдущей работы.

**Совместные отказы** – отказы элементов объекта, которые могут одновременно появиться в количестве двух и более.

**Несовместные отказы** – отказы, из которых никакие два не могут появиться вместе.

**Независимые отказы** – вероятности их появления не зависят друг от друга.

**Зависимые отказы** – вероятность появления одного отказа связана с вероятностью появления другого.

Инженерная классификация отказов:

**1. По моменту выявления:**

- до выполнения функций;
- во время выполнения функций.

**2. По последствиям:**

- без последствий;
- приводит к невыполнению функций;
- приводит к происшествиям.

**3. По причинам:**

- конструктивно-производственные ошибки;
- ошибки оперативного персонала;
- внешние или случайные причины.

**4. По способу устранения:**

- восстановление работоспособности на месте эксплуатации;
- частичный ремонт в ремонтных службах;
- капитальный ремонт;
- списание объекта.

Кроме понятия отказ, в прикладной теории надежности и на практике могут использоваться другие понятия, связанные с нарушением работоспособности объекта:

**Поломка** – повреждение объекта, которое может быть устранено силами экипажа или ремонтных служб, не влекущее гибели людей.

**Происшествие** – событие, связанное с нарушением функционирования объекта вследствие его разрушения или повреждения.

**Авария** – полное разрушение объекта или такое его повреждение, что восстановление либо невозможно, либо нецелесообразно (но не влечет гибели людей).

**Катастрофа** – полное или частичное разрушение объекта, влекущее гибель хотя бы одного человека (если смерть людей в результате происшествия наступает в течение 10 суток после него).

Различают отказы: **явные** и **скрытые**, **полные** и **частичные**. В том случае, когда работа энергетической установки прекращается из-за появления дефектов оборудования, происходит полный явный отказ. Установка полностью теряет работоспособность, причем это событие отражается в оперативной документации.

Если из-за дефектов отдельных агрегатов располагаемая мощность установки снижается ниже мощности, заданной диспетчерским графиком нагрузки, но при этом остается выше минимально допустимой, и установка не выводится из работы, то такое событие также фиксируется в оперативной документации. Происходит **частичный явный отказ**.

В том случае, если вследствие появления дефектов элементов оборудования располагаемая мощность установки снизилась до величины, превышающей в данный момент времени диспетчерскую нагрузку, то такое событие может не фиксироваться, для потребителей электрической и тепловой энергии отказ остается незамеченным. Иногда об этом не

подозревают и сами работники, обслуживающие установку. Это случай **частичного неявного отказа**.

**Полный неявный отказ** может произойти в том случае, если оборудование находится в резерве, т.е. предполагается, что по указанию диспетчера через определенное время установка может быть загружена до максимально допустимой мощности. Появление дефектов, которые не позволяют включить установку в работу, приводит к полному отказу, но внешне этот дефект может не проявиться. Такие отказы иногда не фиксируются, если устранение дефектов происходит во время нахождения установки в резерве.

Одна из возможных укрупненных схем классификации отказов приведена на рис.1.3. Более подробная схема классификации отказов, соответствующая ГОСТ 27.002-89, приведена на рис.1.4.



Рис.1.3. Укрупненная схема классификации отказов



Рис.1.4. Схема классификации отказов по ГОСТ 27.002-89

Применяющееся в теории надежности понятие «отказ» в практике эксплуатации электрических станций и сетей подразделяется на три термина:

- авария;
- отказ;
- потребительское отключение.

В свою очередь различают отказы 1-й и 2-й степеней. Аварии и отказы учитываются и расследуются.

Внеплановый вывод оборудования из работы или резерва или сброс нагрузки классифицируются по указанным терминам в зависимости от степени нарушения энергоснабжения потребителей, характера повреждения, объема и продолжительности ремонта (посмотреть инструкцию).

Повреждения оборудования, происшедшие во время плановых ремонтов, учитываются как аварии или отказы в зависимости от восстановительного ремонта этого оборудования.

Внеплановый вывод из работы оборудования по оперативной заявке для устранения мелких дефектов (набивка сальников, расшлаковка котлов, устранение утечек масла, замена прокладок и т.д.), выявленных при профилактических осмотрах, аварией или отказом не считается, если он не привел к нарушению диспетчерского графика. Он учитывается только в цеховой документации.

По каждому зафиксированному отказу проводится служебное расследование. Основными задачами расследования являются:

- технически квалифицированное установление причин и виновников нарушений;
- разработка организационных и технических мероприятий по восстановлению работоспособности поврежденного оборудования;
- разработка мероприятий по предупреждению подобных нарушений в будущем;
- разработка мероприятий по повышению ответственности персонала энергопредприятий за выполнение мер, обеспечивающих бесперебойное и надежное энергоснабжение потребителей.

Учет аварий и отказов ведется со дня приемки оборудования и сооружений в эксплуатацию, т.е. со дня подписания акта приемочной комиссией. При этом составляется специальная отчетная карта **2-тех**. Случаи повреждения оборудования, выявленные до приемки в эксплуатацию, а также во время плановых ремонтов и испытаний, не включаются в отчетную форму **2-тех**, но они обязательно учитываются в цеховой документации и картах отказов. При выходе из планового ремонта учет аварий и отказов для тепломеханического оборудования ведется с начала подъема давления, для турбин и других вращающихся механизмов – с момента выхода на номинальные обороты.

**Станционной аварией** считается нарушение режима ее работы, вызвавшее:



- перерыв электроснабжения потребителей первой категории на время более 20 мин или потребителей второй категории на время более 10 ч;
- перерыв в подаче от ТЭЦ технологического пара предприятиям первой категории на срок более 2 ч или предприятиям второй категории на время более 10 ч;
- недоотпуск потребителям электроэнергии в количестве более 50000 КВт•ч или теплоты в количестве более 400 Гкал независимо от продолжительности перерыва;
- полный сброс электрической нагрузки на ГРЭС с установленной мощностью 500 МВт и выше или электрической и тепловой нагрузки на ТЭЦ с установленной мощностью 100 МВт и выше.

**Отказом в работе 1-й степени** считается нарушение режима работы электростанции, вызвавшее:

- перерыв электроснабжения потребителей второй категории на срок от 1 до 10 ч или потребителей третьей категории на срок более 10 ч;
- перерыв в подаче от ТЭЦ технологического пара предприятиям первой категории на срок от 30 мин до 2 ч или предприятиям второй категории на срок от 2 до 10 ч;
- недоотпуск потребителям электроэнергии в количестве от 5000 до 50000 КВт•ч или теплоты в количестве от 50 до 400 Гкал независимо от продолжительности перерыва;
- полный сброс электрической нагрузки на ГРЭС с установленной мощностью от 100 до 500 МВт или электрической и тепловой нагрузки на ТЭЦ с установленной мощностью от 25 до 100 МВт.

**Отказом в работе 2-й степени** считается нарушение режима работы электростанции, вызвавшее:

- повреждение оборудования, требующего восстановительного ремонта менее 3 сут.;

- недоотпуск потребителям электроэнергии в количестве от 500 до 5000 КВт•ч или теплоты в количестве от 20 до 50 Гкал независимо от продолжительности перерыва.

Аварии и отказы классифицируются по вине оперативного персонала, если они вызваны неправильными его действиями, нарушениями им правил технической эксплуатации (ПТЭ), техники безопасности (ПТБ), правил взрыво- и пожарной безопасности эксплуатации (ПВПБ) или нарушениями производственных инструкций.

По вине ремонтного персонала аварии и отказы классифицируются вследствие некачественного ремонта, неполноценных профилактических осмотров и контроля оборудования, неправильных действий и нарушений правил производства ремонтных работ (РДПр) и требований ПТЭ, ПТБ, ПВПБ.

По вине руководящего персонала аварии и отказы классифицируются вследствие непринятия своевременных мер по устранению аварийных очагов и дефектов оборудования, невыполнения направленных на повышение надежности работы оборудования директивных указаний вышестоящих органов, несвоевременного или проведенного в недостаточном объеме ремонта или профилактического испытания оборудования, невыполнения противоаварийных циркуляров, нарушения ПТЭ, ПТБ, ПВПБ, руководящих указаний по организации работы с персоналом.

Аварии и отказы по вине других организаций классифицируются лишь при наличии достаточного обоснования с участием представителей этих организаций в расследовании. Их причинами могут быть низкокачественное изготовление оборудования, недостатки проектирования, некачественное выполнение строительных, монтажных, ремонтных и наладочных работ, несовершенство и дефектность конструкции.

Аварии и отказы по причине стихийных явлений могут классифицироваться лишь в том случае, когда характеристика этих явлений

(толщина гололеда, скорость ветра и т.д.) превышают расчетные значения, предусмотренные проектом или существующими нормами.

Аварии и отказы по причине естественного износа (старение, изменение свойств материалов, усталостные явления, коррозия и др.) могут быть классифицированы лишь в том случае, если они не могли быть предотвращены в процессе эксплуатации.

Все аварии и отказы в работе на электростанциях и сетях регистрируются в картах отказов. В тех случаях, когда произошел останов энергоустановки, составляется акт расследования и отчет об авариях и отказах. В этих документах прилагаются поясняющие технологические схемы, чертежи и фотографии повреждения, ленты регистрирующих приборов, заключения о работе защит и автоматики, результаты металлографических и других исследований.

Заполненные оперативным персоналом карты отказов предоставляются ежедневно на рассмотрение руководству предприятия и затем направляются в соответствующие производственные службы.

Каждая авария и отказ в работе, происшедшие на электростанции, должны быть тщательно расследованы. Должны быть установлены причины, виновники и определены конкретные мероприятия по предупреждению аналогичных случаев. Расследование нарушений должно быть начато немедленно после их происшествия и закончено в срок не более 10 дней.

Состав комиссии по расследованию регламентируется инструкцией в зависимости от масштаба нарушений. В случае серьезного повреждения оборудования в состав комиссии должны быть включены представители заводов-изготовителей, ремонтных организаций, специалисты по металлографии и расчетам на прочность, представители научно-исследовательских и наладочных организаций.

Карты отказов и акты расследования аварий и отказов направляются в трест «ОРГРЭС», в котором полученный со всех электростанций материал

обобщается. Ежегодно выпускаются сборники по анализу работы и обзору повреждений тепломеханического оборудования.

В табл. 2.1. приведена одна из распространенных классификационных схем категоризации отказов по основным признакам.

Таблица 2.1

Основные классификационные признаки отказов

По типу:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>отказы функционирования</i>, при которых прекращается выполнение объектом основным функций</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>отказы параметрические</i>, при которых параметры объекта изменяются в недопустимых пределах</li> </ul>
По природе возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>случайные отказы</i> – обусловлены непредсказуемыми перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала, сбоями системы управления и т.п.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>систематические отказы</i> – обусловлены закономерными явлениями, вызывающими постепенно накопление повреждений: усталость, износ, коррозия материалов и т.п.</li> </ul>
Характер возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>внезапный отказ</i> – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>постепенный отказ</i> – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта</li> </ul>
<p>Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробой изоляции, обрывы) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.</p> <p>Постепенные отказы - связаны с износом деталей и старением материалов</p>	
Причина возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>конструкционный отказ</i>, вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>производственный отказ</i>, связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>эксплуатационный отказ</i>, вызванный нарушением правил эксплуатации</li> </ul>

Характер устранения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>устойчивый отказ</i></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>перемежающийся отказ</i> (возникающий/исчезающий). Последствия отказа: легкий отказ (легкоустранимый)</li> </ul>
Характер устранения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>средний отказ</i> (не вызывающий отказы смежных узлов – вторичные отказы)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>тяжелый отказ</i> (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека)</li> </ul>
Дальнейшее использование объекта:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>полные отказы</i>, исключающие возможность работы объекта до их устранения;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>частичные отказы</i>, при которых объект может частично использоваться</li> </ul>
Легкость обнаружения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>очевидные (явные) отказы</i></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>скрытые (неявные) отказы</i></li> </ul>
Время возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>приработочные отказы</i>, возникающие в начальный период эксплуатации</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>отказы при нормальной эксплуатации</i></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>износосвые отказы</i>, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов</li> </ul>

### ТЕМА 3. Использование теории случайных величин для описания вероятности отказов

#### 3.1. Основные положения теории вероятностей

##### 3.1.1. Событие, вероятность события, частота события

*Событием* называется всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти. Событие – это один из возможных исходов опыта над случайным явлением. *Вероятностью события*, например, события  $A$ , называется число  $P(A)$ , характеризующее объективную степень возможности появления этого события в данном опыте. ***Вероятностью события*** можем назвать отношение числа благоприятствующих исходов к общему количеству возможных исходов в опыте. Событие  $U$ , которое в результате опыта всегда имеет место, носит название *достоверного* события. Вероятность достоверного события  $P(U) = 1$ . Другим крайним случаем

является *невозможное* событие  $V$ , которое в результате опыта не может произойти. Вероятность невозможного события  $P(V) = 0$ . Другие события  $A$  возможные, но не достоверные, будут характеризоваться вероятностями, меньшими единицы:  $0 \leq P(A) \leq 1$ .

При одновременном изучении двух или нескольких событий различают равновозможные и неравновозможные, совместные и несовместные события.

*Равновозможными* событиями называются такие, для которых по условиям симметрии опыта нельзя считать, что одно из них является объективно более возможным, чем другое. И, наоборот, события, для которых по условиям симметрии опыта можно считать, что одно из них является объективно более возможным, чем другое, называются *неравновозможными*. События называются *несовместными*, если никакие два из них не могут появиться вместе и, наоборот, события называются *совместными*, если они могут появиться одновременно.

Несколько событий образуют *полную группу событий*, если в результате опыта обязательно должно произойти хотя бы одно из них. События, обладающие тремя свойствами – **равновозможные, несовместные и составляющие полную группу**, называются *случаями*.

Если опыт сводится к схеме случаев, т.е. обладает симметрией возможных исходов, то вероятность появления события  $A$  в этом опыте равна:

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (3.1)$$

где  $m$  – число случаев, благоприятных событию  $A$ ;  $n$  – общее число случаев (исходов) опыта. Так как число случаев, благоприятных событию  $A$ , всегда заключено между 0 и  $n$  (0 – для невозможного и  $n$  – для достоверного события), то  $0 \leq m \leq n$  и  $0 \leq P(A) \leq 1$ .

Формула (3.1) называется *классической*. Она пригодна для непосредственного подсчета вероятностей только тогда, когда опыт обладает **симметрией** возможных исходов, т.е. сводится к схеме **случаев**. В связи с

этим на практике широко используется *статистическое определение вероятности событий* путем массового эксперимента (многократного повторения одного и того же опыта). Такую вероятность называют частотой события или статистической вероятностью.

*Частотой события*  $P^*(A)$  называется отношение числа опытов  $m^*$ , в которых появилось событие  $A$ , к общему числу проведенных опытов  $n$ :

$$P^*(A) = \frac{m^*}{n}. \quad (3.2)$$

При достаточно большом числе опытов  $n$  частота события может служить *мерой вероятности* этого события. Этот факт для событий, сводящихся к схеме случаев, впервые был доказан **Я. Бернулли** и вошел в теорию вероятностей под названием теоремы Бернулли:

*при достаточно большом числе независимых опытов  $n$  частота появления события  $A$  в этих опытах, т.е.  $P^*(A)$ , сходится по вероятности к вероятности этого события, т.е. к  $P(A)$ .*

Практически это означает, что при независимости опытов и при большом  $n$  можно полагать, что

$$P(A) \cong P^*(A) = \frac{m^*}{n}. \quad (3.3)$$

Многочисленными опытами подтверждено, что выражение (3.3) справедливо и для событий, не сводящихся к схеме случаев (не обладающих симметрией опытов).

#### Пример 1

*В том случае, если статистические данные, полученные при анализе суточных графиков нагрузки, показывают, что длительность максимальной нагрузки в течение суток  $T_{\text{MAX}}$  может быть принята равной 6 ч, то вероятность возникновения максимальной нагрузки (события  $A$ ) в течение суток, как случайного события, может быть принята равной*

$$P(A) = \frac{T_{\text{MAX}}}{24} = \frac{6}{24} = 0,25.$$

### 3.1.2. Зависимые и независимые события, условная вероятность

Два события  $A_1$  и  $A_2$  называются *независимыми*, если вероятность события  $A_1$  не изменяется от того, произошло или не произошло событие  $A_2$ . Если же возможность появления одного события зависит от того, произошло или не произошло другое событие, то такие события называются *зависимыми*.

Для зависимых событий, вероятность которых зависит от вероятности других событий, вводится понятие условной вероятности.

*Условной вероятностью* события  $A_1$  называется вероятность этого события, вычисленная при условии, что событие  $A_2$  произошло. Условные вероятности обозначаются:

- $P\left(\frac{A_1}{A_2}\right)$  - вероятность события  $A_1$ , вычисленная при условии, что событие  $A_2$  произошло;
- $P\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$  - вероятность события  $A_2$ , вычисленная при условии, что событие  $A_1$  произошло.

Если  $P\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = P(A_1)$ , то события  $A_1$  и  $A_2$  - независимые события, если  $P\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \neq P(A_1)$ , то события  $A_1$  и  $A_2$  - зависимые события.

### 3.1.3. Сумма и произведение событий

Для *сложных событий* способы определения вероятностей непосредственным подсчетом (см. 3.1) или экспериментально по частоте (см. 3.2) не всегда приемлемы из-за громоздкости подсчетов и большой стоимости экспериментов. Поэтому для определения вероятности сложного события применяются *косвенные методы*, позволяющие по известным вероятностям одних, более простых, событий определять вероятности других, с ними связанных, более сложных событий. Косвенные методы базируются на понятиях суммы и произведения событий и теоремах сложения и умножения вероятностей.



*Суммой  $n$  событий* называется сложное событие, состоящее в появлении хотя бы одного события из  $n$ .

*Произведением  $n$  событий* называется сложное событие, состоящее в совместном проявлении всех  $n$  событий.

### 3.1.4. Теорема сложения вероятностей

Вероятность суммы  $n$  независимых и несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий

$$P(\sum_{i=1}^n A_i) = \sum_{i=1}^n P(A_i). \quad (3.4)$$

Пример 2

*Определить вероятность ремонта агрегата в течение года, если ремонт агрегата при его отказах в течение года (событие  $A_1$ ) производится с вероятностью  $P(A_1) = 0,025$ , а его плановый ремонт (событие  $A_2$ ) с вероятностью  $P(A_2) = 0,03$ .*

*Эти события (аварийно–восстановительный и плановый ремонты) являются независимыми и несовместными событиями. Следовательно, вероятность ремонта агрегата в течение года равна*

$$P(A_1+A_2) = P(A_1) + P(A_2) = 0,025 + 0,03 = 0,055.$$

**Следствие 1.** Сумма вероятностей двух противоположных событий  $A$  и  $\bar{A}$  равна единице

$$P(A + \bar{A}) = 1. \quad (3.5)$$

Противоположными событиями называются два независимых и несовместных события, образующих полную группу случайных событий.

Пример 3

*Например, противоположными событиями являются событие безотказной работы трансформатора и событие его отказа. Следовательно, если вероятность безотказной работы трансформатора  $P(A)=0.98$ , то вероятность отказа трансформатора  $P(\bar{A}) = 1 - 0,98 = 0,02$ .*

**Следствие 2.** Вероятность суммы двух *независимых* и *совместных* событий  $A_1$  и  $A_2$  равна сумме вероятностей этих событий минус вероятность их совместного наступления  $P(A_1 \cdot A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2)$  (см. 3.9), т.е.:

$$P(A_1 + A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 \cdot A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1) \cdot P(A_2). \quad (3.6)$$

Пример 4

*Например, турбогенератор в течение года может отключиться из-за отказов оборудования его тепловой части (событие  $A_1$ ) с вероятностью  $P(A_1) = 0,054$  и из-за отказов оборудования его электрической части (событие  $A_2$ ) с вероятностью  $P(A_2) = 0,005$ . Эти события являются независимыми и совместными (отказы оборудования тепловой части и оборудования электрической части могут наступить и одновременно), поэтому вероятность отключения турбогенератора в течение года равна  $P(A_1 + A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1) \cdot P(A_2) = 0,054 + 0,005 - 0,054 \cdot 0,005 = 0,059$ .*

### 3.1.5. Теорема умножения вероятностей

Вероятность произведения двух событий  $P(A_1 \cdot A_2)$  равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое событие произошло

$$P(A_1 \cdot A_2) = P(A_1) \cdot P\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = P(A_2) \cdot P\left(\frac{A_1}{A_2}\right). \quad (3.7)$$

**Следствие 1.** Условная вероятность события  $A_1$  по отношению к событию  $A_2$  или, иначе, вероятность события  $A_1$ , вычисленная при условии, что событие  $A_2$  произошло, равна

$$P\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \frac{P(A_1 \cdot A_2)}{P(A_2)}. \quad (3.8)$$

Пример 5

*Например, линия электропередачи подключена к распределительному устройству посредством выключателя. Вероятность короткого замыкания (КЗ) на линии (событие  $A_2$ )  $P(A_2) = 0,005$ . Вероятность отказа выключателя (событие  $A_1$ ) при автоматическом отключении КЗ на линии  $P(A_1 \cdot A_2) =$*

0,001. Следовательно, условная вероятность отказа выключателя при автоматическом отключении КЗ на линии  $P\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \frac{P(A_1 \cdot A_2)}{P(A_2)} = \frac{0,001}{0,005} = 0,2$ .

**Следствие 2.** Вероятность произведения двух независимых и совместных событий равна произведению вероятностей этих событий

$$P(A_1 \cdot A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2). \quad (3.9)$$

Пример 6

Например, вероятность возникновения максимальной нагрузки в системе (событие  $A_1$ )  $P(A_1) = 0,8$ . Вероятность отказа трансформатора (событие  $A_2$ )  $P(A_2) = 0,07$ . Эти события независимы и совместны. Следовательно, вероятность возникновения максимальной нагрузки при отказе трансформатора, равна

$$P(A_1 \cdot A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2) = 0,8 \cdot 0,07 = 0,056.$$

**Следствие 3.** Вероятность произведения  $n$  событий равна произведению вероятностей этих событий, причем вероятность каждого следующего по порядку события вычисляется при условии, что все предыдущие события произошли

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n) = P(A_1) \cdot P\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \cdot P\left(\frac{A_3}{A_1 A_2}\right) \cdot \dots \cdot P\left(\frac{A_n}{A_1 A_2 \dots A_{n-1}}\right). \quad (3.10)$$

**Следствие 4.** Вероятность произведения  $n$  независимых и совместных событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (3.11)$$

### 3.1.6. Формула полной вероятности

Следствием двух теорем – теоремы сложения вероятностей и теоремы умножения вероятностей – является формула полной вероятности. Пусть требуется определить вероятность  $P(A)$  некоторого события  $A$ , которое может произойти вместе с одним из событий  $H_1, H_2, \dots, H_n$ , образующих полную группу несовместных событий. События  $H_1, H_2, \dots, H_n$  называются гипотезами. В этом случае

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P\left(\frac{A}{H_i}\right). \quad (3.12)$$

Формула (3.12) – формула полной вероятности, которая позволяет определить вероятность события  $A$  (полную вероятность события), если известны вероятности гипотез  $P(H_i)$  и условные вероятности события  $A$  при наступлении каждой гипотезы.

### **3.1.7. Случайная величина**

*Случайной величиной* называется величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно.

Случайная величина характеризует количественный результат опыта (испытания). Конкретное значение случайной величины, полученное в результате опыта, является величиной неслучайной и ее принято называть *реализацией* случайной величины. Поскольку любое явление, в том числе и случайное, может определяться несколькими факторами и иметь несколько характеристик, то с одним случайным явлением может быть связано несколько случайных величин.

Случайная величина считается заданной, если указаны ее возможные значения и вероятности их появления. В зависимости от характера возможных значений различают два основных типа случайных величин: *дискретные* и *непрерывные*.

## **3.2. Особенности распределения дискретных случайных величин**

При анализе надежности работы оборудования существенным является тот факт, что отказ представляет случайное событие. Момент возникновения отказа, т.е. перехода из работоспособного состояния в неработоспособное заранее неизвестен. Именно поэтому возникла и существует проблема надежности. В этом главная специфика и трудность фактического обеспечения надежности. Если бы отказы носили детерминированный характер, проблемы надежности не существовало бы вовсе. Случайный характер появления отказов определяет и подход к анализу надежности. Для

этой цели используется математический аппарат теории вероятностей и математической статистики.

В общем случае, как уже отмечалось, случайной величиной называется величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, причем заранее неизвестно, какое именно. Случайные величины могут быть дискретными, т.е. принимать строго фиксированные значения, или непрерывными, принимать любые значения внутри ограниченного или неограниченного интервала.

Рассмотрим количество отказов в работе установки в течение года. Здесь случайная величина  $X$  – количество отказов, возможные значения  $x_1=0, x_2=1, x_3=2, \dots, X_n=n$ . Каждое из этих значений возможно, но не достоверно. Величина  $X$  может принять каждое из них с некоторой вероятностью. В результате опыта величина  $X$  примет одно из этих значений, т.е. произойдет одно из полной группы несовместных событий. Обозначим вероятности этих событий

$$P(x = x_1) = p_1, P(x = x_2) = p_2, \dots, P(x = x_n) = p_n,$$

Так как несовместные события образуют полную группу, то

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

Сумма вероятностей всех возможных значений случайной величины равна единице. Эта суммарная вероятность каким-то образом распределена между отдельными значениями. Случайная величина будет полностью описана с вероятностной точки зрения, если зададим ее распределение, т.е. укажем, какой вероятностью обладает каждое из событий.

Законом распределения случайной величины называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями и соответствующими вероятностями их появления. Простейшей формой задания закона распределения дискретной случайной величины (ДСВ) является табл. 3.1, в которой перечисляются возможные значения случайной величины и соответствующие им вероятности.

Табличное задание закона распределения

X	$x_1$	$x_2$	...	$x_n$
P	$p_1$	$p_2$	...	$p_n$

Такая таблица называется рядом распределения случайной величины. Чтобы придать ряду распределения более наглядный вид, используют графическое представление. По оси абсцисс откладывают возможные значения случайной величины, по оси ординат – вероятности этих значений. Для наглядности полученные точки соединяются отрезками прямых. Такая фигура называется многоугольником распределения (рис. 3.1).

#### Пример 7

В техническом объекте 2 неисправные и 4 исправные детали. Из него последовательно вынимают детали до первого появления исправной детали. Построить ряд и многоугольник распределения ДСВ - числа извлеченных деталей X.

#### Решение

Рассмотрим все возможные значения, которые может принимать случайная величина X:

$x_1 = 1$  - первой вынули исправную деталь;

$x_2 = 2$  - первая вынутая деталь неисправная, вторая исправная;

$x_3 = 3$  - первая деталь неисправная, вторая деталь неисправная, третья деталь исправная.

Соответствующие им вероятности  $p_1, p_2, p_3$  найдем воспользовавшись правилом умножения вероятностей (заметим при этом, что события зависимы):

$$p_1 = P(X = x_1 = 1) = 4/6 = 2/3;$$

$$p_2 = P(X = x_2 = 2) = (2/6) (4/5) = 4/15;$$

$$p_3 = P(X = x_3 = 3) = (2/6) (1/5) (4/4) = 1/15.$$

Таким образом, закон распределения случайной величины  $X$  примет вид табл. 3.2:

Таблица 3.2

Ряд распределения случайной величины

$X$	1	2	3
$P$	$2/3$	$4/15$	$1/15$

По полученным данным строим многоугольник распределения, откладывая на оси абсцисс значения  $x_i$ , а на оси ординат - соответствующие значения вероятностей  $p_i$ :

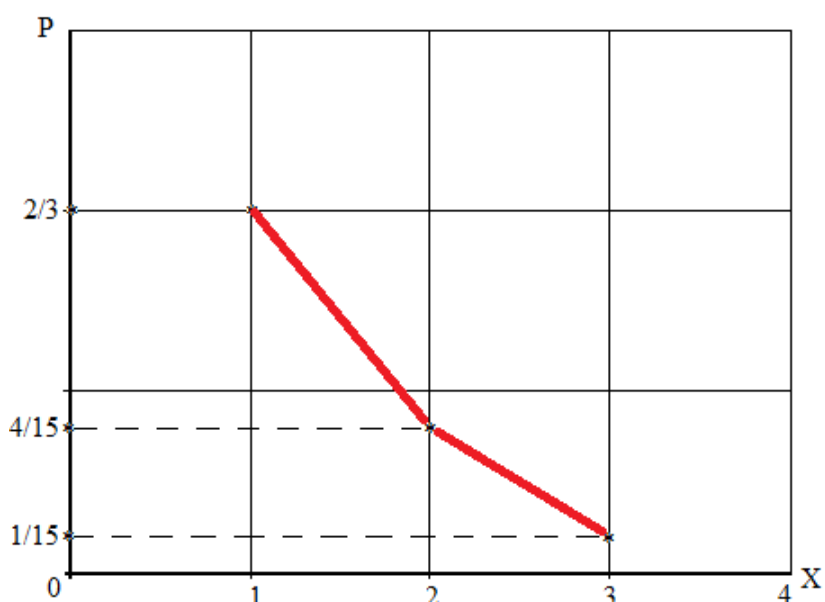


Рис.3.1. Многоугольник распределения ДСВ

Представление закона распределения в виде таблицы или многоугольника распределения возможно только для дискретной случайной величины.

### 3.3. Характеристики распределения непрерывных случайных величин

Для непрерывной величины такой характеристики построить нельзя, поскольку она имеет бесчисленное множество возможных значений, сплошь заполняющих некоторый промежуток. Для количественной характеристики

этого распределения используют не вероятность некоторого события  $X = x_0$ , а вероятность события  $X < x_{0\tau}$ , где  $x_{0\tau}$  – некоторая текущая переменная.

Вероятность этого события зависит от  $x_{0\tau}$  и является функцией от  $x_{0\tau}$ . Эта функция называется функцией распределения случайной величины  $X$  и обозначается  $F(x)$ .

$$F(x) = P(X < x).$$

Функцию распределения  $F(x)$  называют также интегральной функцией распределения или интегральным законом распределения.

Функция распределения – самая универсальная характеристика случайной величины. Она существует для дискретных и непрерывных величин. Функция распределения полностью характеризует случайную величину с вероятностной точки зрения и является одной из форм закона распределения.

**Функция распределения (интегральная) непрерывной случайной величины, основные свойства:**

1. Функция распределения – неубывающая величина.

При  $x_2 > x_1$   $F(x_2) \geq F(x_1)$ .

2. На «минус бесконечности» функция распределения равна нулю.

$$F(-\infty) = 0.$$

3. На «плюс бесконечности» функция распределения равна единице.

$$F(+\infty) = 1.$$

График интегральной функции распределения  $F(x)$  в общем случае представляет собой график неубывающей функции, значения которой начинаются от 0 и доходят до 1, причем в отдельных точках функция может иметь скачки, т.е. разрывы.

Общий вид функции распределения показан на рис. 3.2. Функция распределения любой дискретной случайной величины всегда есть разрывная ступенчатая функция, скачки которой всегда происходят в точках,



соответствующих возможным значениям случайной величины, и равны вероятностям этих значений. Сумма всех скачков равна единице.

По мере увеличения числа возможных значений и уменьшения интервалов между ними число скачков становится больше, а сами скачки – меньше; ступенчатая кривая становится более плавной. Случайная дискретная величина приближается к непрерывной, а ее функция распределения – к непрерывной функции.

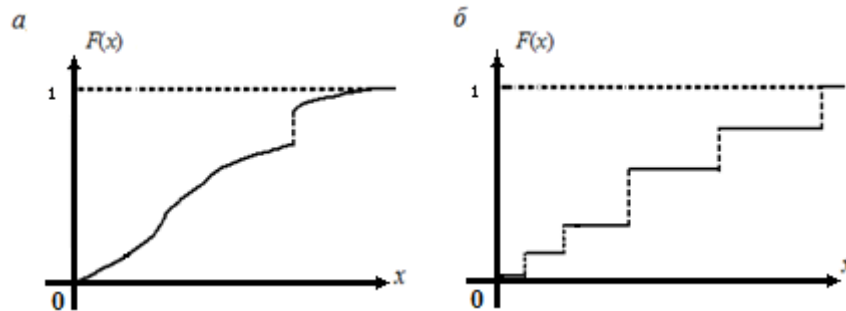


Рис. 3.2. Общий вид функции распределения случайной величины:

а – непрерывной; б - дискретной

При решении практических задач, связанных со случайными величинами, часто необходимо вычислить вероятность того, что случайная величина будет находиться в интервале  $\alpha \leq X < \beta$ . Условимся левый конец неравенства включать в интервал, а правый не включать. Вероятность попадания случайной величины на заданный участок равна приращению функции распределения на этом участке. Будем неограниченно уменьшать участок  $(\alpha, \beta)$ , предполагая, что  $\beta \rightarrow \alpha$ . В пределе вместо вероятности опадания на участок получим вероятность того, что случайная величина  $X$  примет отдельно взятое значение  $a$ :

$$P(X = \alpha) = \lim_{\beta \rightarrow \alpha} P(\alpha \leq X < \beta) = \lim_{\beta \rightarrow \alpha} [F(\beta) - F(\alpha)].$$

Значение этого предела зависит от того, непрерывна ли функция  $F(x)$  в точке  $x=a$  или же терпит разрыв. Если существует разрыв, то предел равен значению скачка. Если функция непрерывна, то этот предел равен нулю.

Рассмотрим отношение вероятности попадания случайной величины  $X$  на участок от  $x$  до  $(x + \Delta x)$  к длине этого участка, т.е. среднюю вероятность,

приходящуюся на единицу длины на этом участке. При стремлении  $\Delta x$  к нулю в пределе получим производную от функции распределения

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{[F(x + \Delta x) - F(x)]}{\Delta x}.$$

Функция  $f(x)$  характеризует плотность, с которой распределены значения случайной величины в данной точке. Эта функция называется **плотностью распределения** случайной величины  $X$ . Ее также называют **плотностью вероятности**, или **дифференциальной функцией распределения**. Кривая, изображающая на рис. 3.3. плотность распределения случайной величины, называется кривой распределения.

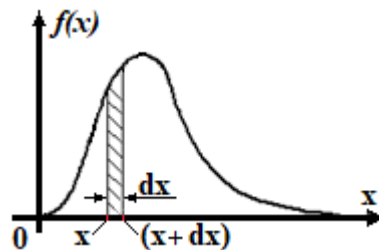


Рис. 3.3. Общий вид плотности распределения случайной величины

Вероятность попадания случайной величины  $X$  на элементарный участок шириной  $x, x+dx$  равна  $f(x)dx$ . Величина  $f(x)dx$  называется элементом вероятности. Геометрически это площадь элементарного прямоугольника, опирающегося на отрезок  $dx$ . Вероятность попадания величины  $X$  на отрезок от  $a$  до  $b$  равна сумме элементов вероятности на этом участке, т.е. интегралу

$$P(\alpha < X < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx.$$

Геометрически вероятность попадания величины  $X$  на участок  $(\alpha, \beta)$  равна площади под кривой распределения на этом участке.

Функция распределения связана с плотностью распределения зависимостью

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx.$$

Геометрически значение функции распределения равно площади под кривой распределения, лежащей левее точки  $x$ .

**Основные свойства плотности распределения:**

1. Плотность распределения есть неотрицательная функция  $f(x) > 0$ .
2. Интеграл в бесконечных пределах от плотности распределения равен единице:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1.$$

Геометрически основные свойства плотности означают, что вся кривая плотности распределения лежит не ниже оси абсцисс, и полная площадь под кривой равна единице.

Функция распределения, как и вероятность, есть величина безразмерная. Размерность плотности распределения обратна размерности случайной величины.

Как отмечалось в разделах 3.1.4 и 3.1.5, в теории вероятностей для расчета статистических процессов используются две основные теоремы:

**Теорема сложения вероятностей:** Вероятность суммы двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий, как это иллюстрируется примером 2 и формулой (3.4).

**Теорема умножения вероятностей:** Вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое событие произошло, как это отображено формулой (3.7) и проиллюстрировано примером 5.

Если события независимые, то вероятность их совместного появления равна произведению вероятностей этих событий (пример 6).

**Плотность вероятности  $f(x)$**  характеризует распределение вероятности значений случайной величины  $x$  до получения дополнительной информации о поведении этой величины и поэтому называется иногда **безусловной плотностью вероятности  $f(x)$** .

Допустим, что в качестве случайной величины рассматриваем появление отказа оборудования после продолжительности работы  $t$ . Распределение этой вероятности имеет безусловную плотность  $f(t)$ . Далее наблюдаем за оборудованием в течение времени от  $t=0$  до  $t=t_1$  и видим, что за этот период отказы не наблюдались.

Вероятность появления отказа в момент времени  $t_1$  при условии, что в течение периода от  $t=0$  до  $t=t_1$  отказы не появятся, будет иной, чем вероятность появления отказа в момент времени  $t=0$ , когда информация о поведении оборудования в течение периода от  $t=0$  до  $t=t_1$  отсутствует.

Безотказная работа оборудования в течение времени  $t_1$  и появление отказа в момент  $t_1$  есть два зависимых события. В теории надежности для расчета подобных явлений используется еще одна характеристика непрерывной случайной величины  $\lambda(t)$ , представляющая собой условную плотность вероятности того, что отказ произойдет в малом интервале времени  $[t, t+dt]$ , если известно, что ранее отказа не наблюдалось (интенсивность отказов).

Предположим, что закон распределения случайной величины – время появления отказа оборудования – описывается функцией распределения  $F(t)$  и плотностью вероятности  $f(t)$ . По определению, значение  $F(t)$  равно вероятности того, что отказ оборудования появится в промежутке времени  $[0, t]$ , а вероятность появления отказа в течение малого промежутка времени  $[t, t+dt]$  равна  $f(t)dt$ . Тогда вероятность безотказной работы на интервале  $[0, t]$  будет равна  $1-F(t)$ , а вероятность появления отказа на интервале  $[t, t+dt]$  при условии, что до этого момента отказов не было, равна  $\lambda(t)dt$ . Рассматривая появление отказа на интервале времени  $[t, t+dt]$  как два последовательных события: отсутствие отказов до момента  $t$  и наступление отказа на интервале  $[t, t+dt]$ , по теореме умножения вероятностей получим  $f(t)dt = [1 - F(t)] \lambda(t)dt$ , откуда найдем выражение для вычисления условной плотности вероятности  $\lambda(t)$  через безусловные характеристики  $f(t)$  и  $F(t)$ :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}.$$

Так как  $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$ , поэтому:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt, \quad (3.13)$$

тогда:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - \int_0^t f(t) dt},$$

$$\lambda(t) = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1 - F(t)}.$$

В свою очередь, функция распределения  $F(t)$  и безусловная плотность распределения  $f(t)$  могут быть представлены через условную плотность:

$$\lambda(t) = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1 - F(t)} = - \frac{\frac{d[1 - F(t)]}{dt}}{1 - F(t)} = - \frac{d \ln[1 - F(t)]}{dt}$$

или

$$\lambda(t) dt = d \ln[1 - F(t)]$$

Интегрируя это выражение от 0 до  $t$  и учитывая, что  $F(0) = 0$ , получим

$$\int_0^t \lambda(t) dt = - \ln[1 - F(t)],$$

$$1 - F(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}, \quad (3.14)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Из  $\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$  получим

$$f(t) = \lambda(t) [1 - F(t)] = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Во многих практических вопросах нет необходимости использовать полную характеристику случайной величины в виде закона распределения. Обычно удобнее пользоваться отдельными числовыми параметрами, отражающими основные свойства случайной величины.

Параметрами, определяющими положение случайной величины на числовой оси, служат характеристики положения. Главной из них является математическое ожидание случайной величины, равное сумме произведений всех возможных значений случайной величины на вероятность этих значений. Это средневзвешенное значение случайной величины или теоретическое среднее арифметическое всех возможных значений. Напомним, что для дискретной случайной величины математическое ожидание определяется по формуле

$$m_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i,$$

для непрерывной – по формуле

$$m_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$$

Наиболее важной характеристикой рассеивания случайной величины является дисперсия случайной величины, равная математическому ожиданию квадрата разности случайной величины и ее математического ожидания. Для вычисления дисперсии используются формулы:

для дискретной случайной величины

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i$$

для непрерывной

$$D_x = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 f(x)dx$$

Дисперсия случайной величины имеет размерность квадрата случайной величины. Для наглядной характеристики рассеивания удобнее пользоваться величиной, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины. Для этого из дисперсии извлекают квадратный корень. Полученная величина называется средним квадратичным отклонением случайной величины.

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}.$$

Математическое ожидание  $m_x$  и дисперсия  $D_x$ , или среднее квадратичное отклонение  $\sigma_x$ , характеризуют наиболее важные черты распределения: его положение и степень разбросанности. Довольно часто ограничиваются только этими двумя показателями.

Теория вероятностей имеет дело с теоретическими величинами, такими, как вероятности событий, математическое ожидание, законы распределения случайных величин, дисперсии. На практике приходится иметь дело с реальными величинами, полученными в результате опыта. Это средние арифметические, частота событий и т.д. Вопросами обработки экспериментальных данных, анализа явлений по полученным результатам при массовых явлениях занимается математическая статистика.

Теория вероятностей предполагает, что при изучении случайных величин мы можем в результате опыта получить какое-либо значение случайной величины из совокупности возможных значений. Эта совокупность называется генеральной совокупностью. Для непрерывной случайной величины генеральная совокупность ее возможных значений бесчисленна, для дискретной величины она может быть также не ограничена или иметь чрезвычайно большое количество возможных значений.

В результате проведения опытов мы получаем только несколько значений случайной величины, может быть достаточно большое количество, но всегда ограниченное. Эти значения, выбранные случайным образом из генеральной совокупности, образуют выборочную совокупность значений. Совершенно очевидно, что характеристики выборочной совокупности могут отличаться от характеристик генеральной совокупности. Однако при увеличении количества опытов (объема выборки) параметры выборочной совокупности будут приближаться к характеристикам генеральной совокупности: среднее арифметическое к математическому ожиданию, частота к вероятности и т.д.

По аналогии с теорией вероятности, статистической функцией распределения  $F^*(x_i)$  случайной величины  $X$  называется **частота события** появления значений величины  $X < x_i$ :

$$F^*(x_i) = P^*(X < x_i)$$

Для того, чтобы найти значение статистической функции распределения при данном  $x_i$ , необходимо подсчитать число опытов, в которых случайная величина  $X$  приняла значение, меньшее чем  $x_i$ , и разделить это количество на общее число произведенных опытов.

Статистическая функция распределения любой случайной величины (прерывной, дискретной или непрерывной) представляет собой прерывную ступенчатую функцию (см. рис. 3.1), скачки которой соответствуют наблюдаемым значениям случайной величины и по величине равны частотам этих значений. Если каждое отдельное значение случайной величины

наблюдалось только один раз, то скачок статистической функции распределения в каждом наблюдаемом значении будет равен  $1/n$ , где  $n$  – число наблюдений.

Согласно **теореме Бернулли** (3.3), при увеличении числа опытов  $n$  частота события  $X < x_i$  для любого  $x_i$  сходится по вероятности к вероятности этого события. Следовательно, при увеличении  $n$  статистическая функция распределения будет приближаться к подлинной функции распределения  $F(x)$  случайной величины  $X$ . Если  $X$  – непрерывная случайная величина, то при увеличении числа наблюдений  $n$  число скачков функции  $F^*(x)$  будет увеличиваться, а сами скачки уменьшаться. График функции  $F^*(x)$  приблизится к плавной кривой  $F(x)$ .

В принципе построение статистической функции распределения полностью решает задачу возможного теоретического описания экспериментального материала. Однако при большом числе опытов построение  $F^*(x)$  трудоемко. Кроме того, во многих случаях оказывается более удобным представить результаты в виде, аналогичном плотности распределения случайной величины.

При большом числе наблюдений (порядка сотен) простая статистическая совокупность становится слишком громоздкой. Для большей компактности на основании простой статистической совокупности строится так называемый «статистический ряд». Для этого весь диапазон наблюдаемых значений  $X$  разбивается на интервалы, затем подсчитывается количество значений  $m_i$  случайной величины  $X$ , попавших в каждый  $i$ -й интервал. Это число делится на общее количество наблюдений  $n$ , в результате чего определяется частота событий попадания случайной величины в каждый интервал:

$$p_i^* = \frac{m_i}{n}.$$

Сумма частот всех разрядов будет равна единице:

$$\sum_{i=1}^n P_i^* = 1.$$



Табл. 3.3, в которой приведены разряды в порядке их расположения вдоль оси  $X$  и соответствующие им частоты, называется статистическим рядом.

Таблица 3.3.

Статистический ряд распределения случайной величины

№ интервала	1	2	...	$i$	$k$
Ширина интервала	$x_1-x_2$	$x_2-x_3$	...	$x_i-x_{i+1}$	$x_k-x_{k+1}$
Частота попадания $X$ в интервал	$P^*_1$	$P^*_2$	...	$P^*_i$	$P^*_k$

При группировке по разрядам значения величины  $X$ , попавшие точно на границы интервала, относят с половиной частоты попадания в каждый сопряженный интервал. Число разрядов, на которых группируется статистический материал, не должно быть ни слишком большим (тогда частоты будут случайным образом колебаться), ни слишком малым, чтобы не было слишком грубой оценки. Обычно ограничиваются количеством интервалов  $k = 10 \dots 20$ . Длины интервалов могут быть одинаковыми или различными. Если плотность распределения очень неравномерна, то удобно выбирать в области высокой плотности более узкие интервалы, а в области низкой плотности – более широкие. Далее предполагается, что внутри каждого интервала случайная величина принимала только одно значение, равное среднему арифметическому границ интервала:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}.$$

Согласно этому предположению значения случайной величины меньше  $\bar{x}_i$  в опытах не наблюдались, т.е., для  $x < \bar{x}_i$  имеем  $F^*(x) = 0$ . Далее, при  $x = \bar{x}_1$ , происходит скачкообразное увеличение значения функции распределения на величину  $P^*_1$ , которое сохраняется до  $x = \bar{x}_2$ . При этом значении  $x$  функция распределения увеличивается до  $F^*(x_2) = P^*_1 + P^*_2$ .

Аналогичным образом график функции распределения строится для остальных интервалов. Последний скачок функции на величину  $P^*_k$

происходит в точке  $x = \bar{x}_k$ . Здесь функция распределения достигает своего максимального значения  $F(x) = 1$ . Это соответствует тому, что в опытах не наблюдались величины  $x > \bar{x}_k$ .

В тех случаях, когда не требуется полной информации о законе распределения случайной величины, бывает достаточно ограничиться некоторыми численными характеристиками.

По аналогии с теорией вероятности, в математической статистике для представления о поведении случайной величины наиболее часто применяются характеристика положения (среднее арифметическое – аналог математическому ожиданию) и характеристики разброса значений случайной величины относительного среднего положения (выборочные дисперсия и среднеквадратичное отклонение – аналоги дисперсии и среднеквадратичного отклонения генеральной совокупности).

Среднее арифметическое наблюдаемой величины рассчитывается по формуле

$$m_x^* = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Эту характеристику иногда называют статистическим средним случайной величины. При достаточно большом  $n$  величина  $m_x^*$  сходится по вероятности к математическому ожиданию. При ограниченном числе опытов статистическое среднее является случайной величиной, которая, тем не менее, связана с математическим ожиданием и может дать о нем известное представление.

Для того, чтобы различать дисперсию и среднее квадратичное генеральной совокупности и подобные характеристики выборочной совокупности, обычно первые величины обозначают буквами  $D$  и  $\sigma$ , а выборочные характеристики – буквами  $S^2$  и  $S$ .

Выборочная дисперсия рассчитывается по формуле

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n};$$

выборочное среднеквадратичное отклонение

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}.$$

Теоретически показано, что средним значением  $S^2$  является не дисперсия генеральной совокупности  $D_x$ , а несколько меньшая величина  $\frac{n-1}{n} D_x$ . Таким образом, величина  $S^2$  будет сходиться по вероятности не к теоретическому значению  $D_x$ , а к несколько меньшему значению  $\frac{n-1}{n} D_x$ .

При этом оценка величин  $D$  и  $\sigma$  по величинам  $S^2$  и  $S$  дает некоторое смещение результатов, которое можно устранить, введя соответствующие поправки:

$$\begin{aligned}\bar{S}^2 &= S^2 \frac{n}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \\ \bar{S} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.\end{aligned}$$

Величина  $\bar{S}^2$  называется несмещенной оценкой дисперсии, или несмещенной выборочной дисперсией. Величина  $\bar{S}$  называется несмещенным средним квадратичным отклонением.

Отметим, что расчет значения выборочной дисперсии удобно производить по формуле:

$$\bar{S}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n-1}.$$

## **ТЕМА 4. Основные законы распределения отказов как случайных событий**

### **4.1. Виды математического описания случайных величин**

Для любой случайной величины  $X$ , непрерывной или дискретной, существует закон ее распределения. Формы записи этого закона могут быть различными. Для дискретных случайных величин это ряд распределения, или интегральный закон, функция распределения  $F(x)$ . Для непрерывной случайной величины используются интегральный закон, функция распределения  $F(x)$  и дифференциальная форма – плотность распределения  $f(x)$ . На практике эти законы проявляются в виде реализации определенных

событий, причем данные о распределении случайной величины существуют только в виде набора пар чисел: значение случайной величины – частота появления этого значения.

Для того, чтобы проводить прогностические расчеты, необходимо иметь аналитическую запись этих законов в виде определенных математических формул. Вид математического описания выбирается исходя из теоретических представлений о распределении случайной величины или на основании экспериментальных данных. Соответствие аналитических зависимостей и экспериментальных данных достигается путем подбора численных значений коэффициентов, входящих в аппроксимирующие формулы. Эти коэффициенты называются параметрами распределения случайной величины.

Для их подбора обычно применяется принцип максимального правдоподобия, частным случаем которого является метод наименьших квадратов.

#### **4.2. Основные законы распределения непрерывных случайных величин**

Поскольку существует различие в описании распределения непрерывных и дискретных случайных величин, то в изображении и для их аппроксимации применяются различные формулы.

Для непрерывных случайных величин наиболее простым является **равномерное (прямоугольное)** распределение с двумя параметрами  $\{a, b\}$ , соответствующим границам интервала, внутри которого может находиться случайная величина. Это распределение встречается в основном в двух типовых ситуациях: во-первых, когда в некотором интервале все значения случайной величины равновозможны и, во-вторых, при аппроксимации других непрерывных распределений в относительно малых интервалах.

Равномерное распределение на интервале  $[a, b]$  задается плотностью

$$f(x) = \frac{1}{b-a}$$

Функция распределения на этом интервале

$$F(x) = \int_a^x f(x)dx = \frac{1}{b-a} \int_a^x dx = \frac{x-a}{b-a}$$

Условная плотность распределения

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{1}{b-a} \frac{1}{1-\frac{x-a}{b-a}} = \frac{1}{b-x}.$$

Математическое ожидание соответствует середине интервала:

$$m_x = \int_a^b xf(x)dx = \frac{b^2-a^2}{2(b-a)} = \frac{a+b}{2}.$$

Дисперсия распределения

$$D_x = \int_a^b (x - m_x)^2 f(x)dx = \frac{1}{b-a} \int_a^b (x - m_x)^2 d(x - m_x) = \frac{(b-a)^2}{12}.$$

Графики функции и плотности распределения показаны на рис. 4.1.

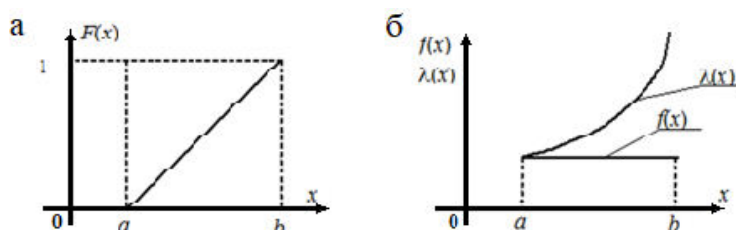


Рис. 4.1. Графики распределения случайной величины по прямоугольному (равномерному) закону:

а – функция распределения; б – плотность распределения

Некоторые случайные величины имеют **ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ** распределение с одним параметром  $\lambda_0 > 0$  (однопараметрическое).

Функция распределения

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda_0 x}.$$

Плотность распределения

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \lambda_0 e^{-\lambda_0 x}.$$

Условная плотность распределения

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1-F(x)} = \frac{\lambda_0 e^{-\lambda_0 x}}{1-(1 - e^{-\lambda_0 x})} = \lambda_0.$$

Закон определен для случайной величины  $x \neq 0$ .

Математическое ожидание случайной величины

$$m_x = \int_0^{\infty} x \lambda_0 e^{-\lambda_0 x} dx = \frac{1}{\lambda_0}.$$

Дисперсия

$$D_x = \int_0^{\infty} \left(x - \frac{1}{\lambda_0}\right)^2 \lambda_0 e^{-\lambda_0 x} dx = \frac{1}{\lambda_0^2}.$$

По экспоненциальному закону, как правило, распределяется случайная величина – продолжительность работы оборудования до отказа, если его отказы не связаны со старением, т.е. износом оборудования, ухудшением определяющих его работоспособность характеристик. Это распределение наблюдается, когда отказы вызываются случайными внешними факторами, например, колебаниями тепловой, электрической или механической нагрузок, изменением качества топлива, особенностями работы различных операторов или другими случайными воздействиями.

Графики функции и плотности экспоненциального распределения показаны на рис. 4.2.

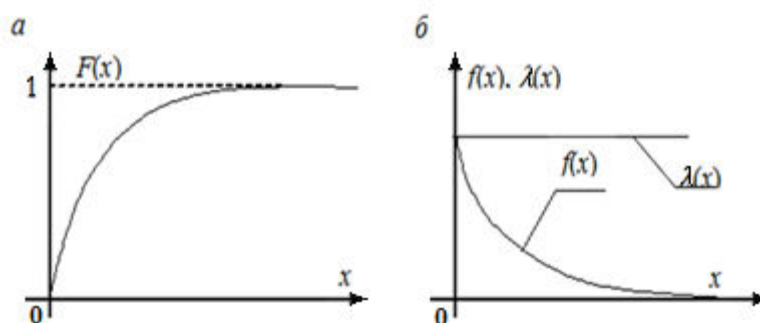


Рис. 4.2. Графики функции (а) и плотности (б) распределения случайной величины по экспоненциальному закону

Наиболее общим является **распределение ГАУССА, или НОРМАЛЬНОЕ распределение**. Этот закон занимает особое положение. Доказано, что сумма достаточно большого числа независимых или слабо зависимых случайных величин, подчиненных каким угодно законам распределения, приближенно подчиняется нормальному закону распределения. По этой причине нормальный закон распределения наиболее часто встречается в природе. Большинство встречающихся на практике случайных величин, таких как, например, ошибки измерений, могут быть представлены как суммы большого числа малых элементарных ошибок,

каждая из которых вызвана действием отдельной причины, не зависящей от остальных. Каким бы законом распределения ни подчинялись отдельные элементарные ошибки, особенности этих распределений в сумме нивелируются и сумма оказывается подчиненной закону, близкому к нормальному.

Нормальный закон распределения характеризуется плотностью вероятности:

$$f(x) = \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right],$$

при  $c = 1$  имеем:

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

Кривая плотности распределения по нормальному закону, приведенная на рис. 4.3, имеет симметричный холмообразный вид. Максимальная ордината кривой, равная  $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ , соответствует точке  $x=m$ . По мере удаления от точки  $x=m$  плотность распределения падает, и кривая асимптотически прижимается к оси  $x$ .

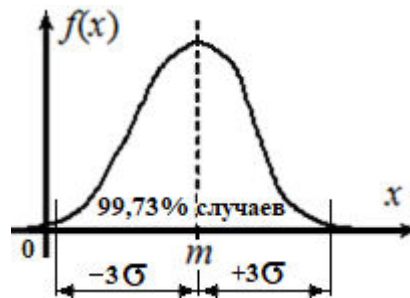


Рис. 4.3. График плотности распределения случайной величины по экспоненциальному закону (распределение Гаусса)

Параметрами распределения являются коэффициенты  $m$  и  $\sigma$ . Величина  $m$  здесь соответствует математическому ожиданию случайной величины;  $\sigma$  - среднее квадратичное отклонение величины  $x$ . Если изменить величину  $m$ , то кривая распределения будет смещаться вдоль оси абсцисс, не меняя своей формы. Центр рассеивания характеризует положение распределения на оси абсцисс. Параметр  $\sigma$  характеризует не положение, а саму форму кривой

распределения. Это характеристика рассеяния. Необходимо сразу заметить, что в область  $(-3\sigma; +3\sigma)$  попадает 99,73 % значений случайной величины  $x$ .

Наибольшая ордината кривой обратно пропорциональна величине  $\sigma$ , чем больше  $\sigma$ , тем ниже максимальное значение  $f(x)$ . Влияние этих параметров показано на рис. 4.4.

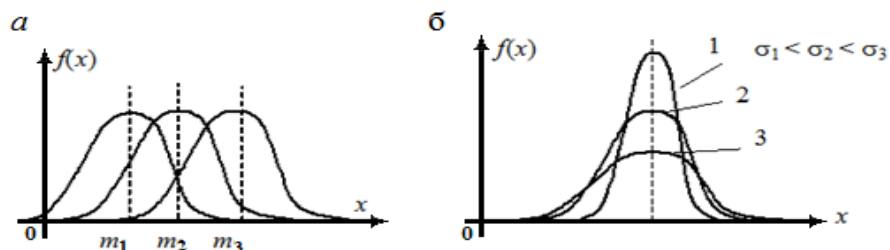


Рис. 4.4. Влияние параметров распределения на координацию и форму плотности распределения Гаусса:

а – математическое ожидание; б – среднеквадратическое отклонение

Во многих задачах, связанных с нормально распределенными случайными величинами, необходимо определить вероятность попадания случайной величины  $X$  в интервал  $[\alpha, \beta]$ :

$$P(\alpha < X < \beta) = F(\beta) - F(\alpha).$$

Здесь  $F(x)$  – функция распределения величины  $X$ :

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

Вычисление значения функции распределения требует в каждом случае численного интегрирования. Чтобы избежать этого, используется нормированное нормальное распределение с  $m = 0$  и  $\sigma = 1$ . Для этого вводится новая переменная  $u$ :

$$u = \frac{x-m}{\sigma}; \quad x = m + \sigma u; \quad dx = \sigma du.$$

Функция распределения принимает вид

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

Обычно используется обозначение

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$



Интеграл  $\int e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  не выражается через элементарные функции. Это так называемый интеграл вероятности. Для него составлены таблицы. Поскольку функция  $\Phi(u)$  симметрична, то  $\Phi(-u) = 1 - \Phi(u)$ . Вероятность нахождения случайной величины  $X$  в диапазоне  $[\alpha, \beta]$  определится выражением

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - m}{\sigma}\right).$$

В ряде таблиц приводится значение интеграла для  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ . При  $u=0$   $\Phi(u) = 0,5$ .

В том случае, когда случайная величина представляет произведение большого числа независимых случайных величин, среди которых нет преобладающих, то распределение ее вероятности соответствует **ЛОГАРИФМИЧЕСКИ НОРМАЛЬНОМУ** распределению.

Плотность распределения определяется выражением

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

параметр нормированного распределения

$$u = \frac{\ln x - m}{\sigma}.$$

Закон определен для случайной величины  $x > 0$ . График плотности распределения показан на рис. 4.5.

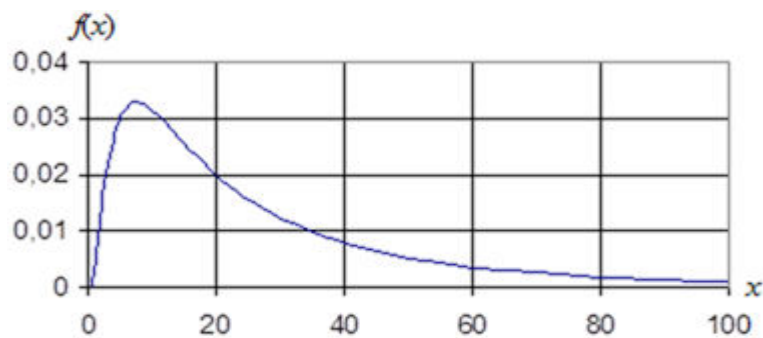


Рис. 4.5. График плотности логарифмически нормального распределения

Это распределение позволяет описать распределение случайной величины, имеющую положительную асимметрию. Нормальное

распределение хорошо согласуется с опытными данными, когда количество измерений достаточно велико. При малом количестве измерений более адекватным является **распределение СТЬЮДЕНТА**. В качестве параметра распределения используется величина

$$t = \frac{x - m_x}{\frac{s}{\sqrt{n}}}.$$

Плотность вероятности распределения параметра  $t$  зависит от величины  $t$  и также от числа степеней свободы  $n_c$ ,  $n_c = n - 1$ . Кривые напоминают кривые нормального распределения, но при малых  $n$  (или  $n_c$ ) они значительно медленнее сближаются с осью абсцисс. Общий вид этих кривых показан на рис. 4.6.

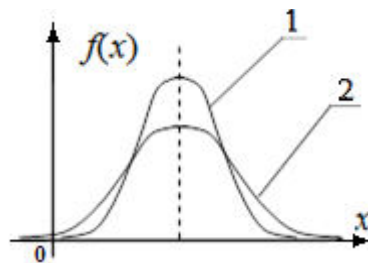


Рис. 4.6. График плотности распределения случайных величин, имеющих нормальное распределение (1) и распределение Стьюдента (2)

При увеличении количества измерений распределение Стьюдента приближается к нормальному распределению. Значения плотности и функции распределения Стьюдента выражаются через гамма-функции, для вычисления которых необходимо численное интегрирование. Поэтому обычно пользуются статистическими таблицами, в которых в зависимости от числа степеней свободы  $n$  для нескольких значений уровня значимости  $\alpha$  приводятся значения параметра  $t_{кр(1)}$ , для которого вероятность появления значений  $t < t_{кр(1)}$  равна доверительной вероятности  $b = 1 - \alpha$  (односторонний критерий) или  $t_{кр(2)}$ , для которого вероятность выполнения условия  $t_{кр(2)} < t < t_{кр(2)}$  равна  $b$  (двухсторонний критерий).

Применительно к описанию усталости металлов Вейбуллом предложено распределение, называемое **распределением ВЕЙБУЛЛА**, функция распределения вероятности которого имеет вид:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-m}{x_0}\right)^n}.$$

Плотность распределения

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \left(\frac{x-m}{x_0}\right)^{n-1} \frac{n}{x_0} e^{-\left(\frac{x-m}{x_0}\right)^n}.$$

Закон определен при  $x > m$ ,  $x_0 > 0$ . Распределение имеет три параметра:  $m$ ,  $x_0$  и  $n$ . Параметр  $m$  соответствует характеристике положения случайной величины, параметр  $x_0$  нормирует значение случайной величины и определяет степень рассеяния. Параметр  $n$  определяет вид (форму) кривой плотности распределения и также оказывает влияние на рассеяние случайной величины. При  $0 < n \leq 1$  график плотности представляет собой L-образную кривую, при  $n > 0$  кривая принимает колоколообразный вид. При  $m=0$  и  $n=1$  распределение Вейбулла переходит в экспоненциальное распределение. Характерный вид кривых показан на рис. 4.7.

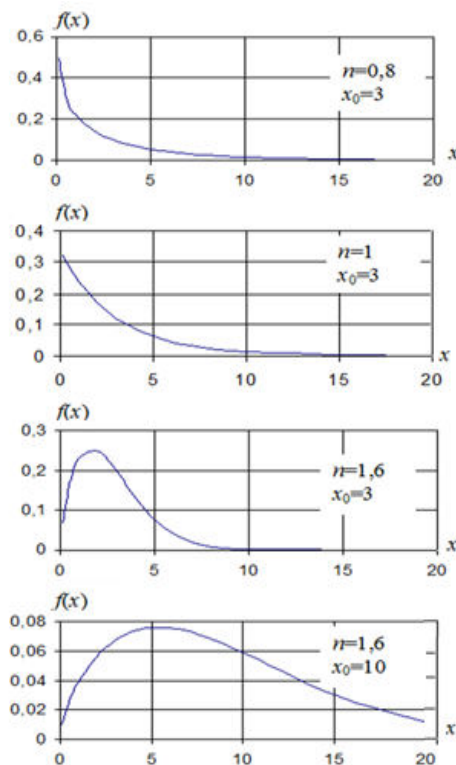


Рис. 4.7. Графики плотности распределения для закона Вейбулла

**В отличие от нормального, распределение Вейбулла не имеет математического обоснования и является только достаточно хорошей аппроксимацией опытных данных.** Вейбулл отмечал, что единственным достоинством этого распределения является простота математического выражения при выполнении необходимых общих условий. Опыт показывает, что во многих случаях это распределение лучше описывает некоторые наблюдения, чем другие известные функции.

Для представления непрерывных случайных величин используются также другие виды распределений, в частности  $\chi^2$  - распределение Пирсона, F-распределение Фишера и т.д. Расчетные формулы или значения функций распределения приводятся в табличном виде в справочной литературе.

#### **4.3. Основные законы распределения дискретных случайных величин**

Для дискретных величин существует только функция распределения, так как производная от функции распределения не определена.

Наиболее общим случаем дискретного распределения является **БИНОМИНАЛЬНОЕ распределение**. Пусть производится  $n$  независимых опытов, в каждом из которых событие  $A$  может появиться либо нет. Вероятность появления события  $A$  во всех опытах постоянна и равна  $p$ . В качестве дискретной случайной величины  $X$  будем рассматривать количество появления события  $A$  в этих опытах. Вероятность  $p_n(m)$  появления события  $A$  именно  $m$  раз

$$p_n(m) = C_n^m p^m (1 - p)^{n-m}.$$

Здесь  $C_n^m$  – число сочетаний  $m$  элементов из  $n$ ,

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

Случайная величина с таким распределением называется биномиальной случайной величиной, а ее распределение – биномиальным. Параметрами распределения являются вероятность появления событий в одном опыте  $p$  и количество опытов  $n$ .

Математическое ожидание этого распределения

$$M(m) = n \cdot p.$$

Дисперсия

$$D(m) = n \cdot p \cdot (1 - p).$$

Такое распределение имеет, например, число отказавших однотипных невосстанавливаемых изделий в течение фиксированного интервала работы.

При  $n \rightarrow \infty$  биномиальный закон сходится к нормальному с параметрами

$$m_n = n \cdot p, \sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)}.$$

При малых вероятностях  $p < 0,1$  и большом количестве опытов,  $n > 10$  биномиальное распределение сводится к **распределению ПУАССОНА**, которое также называется законом редких событий.

Вероятность того, что случайная положительная целая величина  $X$  примет значение  $m$ , равна

$$p(m) = \frac{\lambda^m}{m!} \lambda^m e^{-\lambda}.$$

Параметром распределения является величина  $\lambda > 0$ . Математическое ожидание и дисперсия равны:

$$m_x = \lambda, D_x = \lambda.$$

При больших значениях  $n > 50$  распределение Пуассона приближается к нормальному распределению. Закон Пуассона представляет устойчивое распределение, т. е. сумма случайных величин, каждая из которых имеет распределение Пуассона, также распределена по этому закону.

В статистике используются и другие распределения дискретных случайных величин. При необходимости сведения о них можно найти в справочной литературе.

## **ТЕМА 5. Количественные показатели надежности теплоэнергетического оборудования**

### **5.1. Базовые показатели надежности**

Основными, базовыми показателями надежности любой энергетической установки являются единичные показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности, а также комплексные показатели,

характеризующие совместно свойства безотказности и ремонтпригодности (приведены в табл. 1.1). Рассмотрению комплексных показателей надежности посвящен раздел 6.3 (тема 6).

Специфической особенностью показателей надежности является то, что они представляют собой числовые характеристики случайных величин, таких как наработка объекта на отказ, наработка до предельного состояния, время восстановления работоспособного состояния, число отказов оборудования за фиксированный период времени и т.д.

Фактически надежность любого объекта можно достоверно определить только по завершении эксплуатации объекта, т.е. при достижении им предельного состояния. Для такого объекта известны все характеристики случайных величин, определяющие его надежность. По этим характеристикам можно определить среднюю наработку на отказ, его ресурс и срок службы, среднее время восстановления и т.д. Но это будут фактические показатели конкретного индивидуального объекта. Очевидно, если бы имелась информация об эксплуатации до предельного состояния другого образца, полностью аналогичного по конструкции, технологии изготовления, условиям эксплуатации, то объекты получили бы несколько иные характеристики. Поэтому, когда речь идет о показателях надежности, это означает, что рассматриваются показатели некоторого среднего объекта. Фактические индивидуальные показатели отдельного объекта в этой партии будут отличаться от средних для партии.

В этом смысле показатели надежности объекта следует понимать статистически. Если, например, вероятность безотказной работы объекта в течение времени  $t$  оценивается значением 0,9, то это означает, что из 10 таких объектов в среднем девять отработают время  $t$  безотказно и один откажет до момента  $t$ , причем заранее неизвестно, какой именно.

Рассмотрим далее подробно единичные показатели надежности, к которым относятся безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

## 5.2. Показатели безотказности

Как следует из номенклатуры показателей надежности, приведенной в табл. 1.1. первого раздела, основными показателями безотказности являются *вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка на отказ, средняя наработка до отказа, средняя наработка между отказами*. Названные характеристики восстановления отказов изделия определяются законом восстановления

### 5.2.1. Вероятность безотказной работы. Основной закон надежности. Принцип Н. М. Седякина

Исторически сложилось так, что законом надежности объекта называли закон безотказности. Этот закон  $P(t)$  определяет вероятность безотказной работы в течение заданной наработки  $t$ . Если известен закон распределения продолжительности работы невозстанавливаемого элемента в виде функции распределения  $F(t)$ , то вероятность работы без отказа в течение времени  $t$

$$P(t) = 1 - F(t), \quad (5.1)$$

$$P(\infty) = 0; P(0) = 1.$$

Общий вид этого закона показан на рис.5.1.

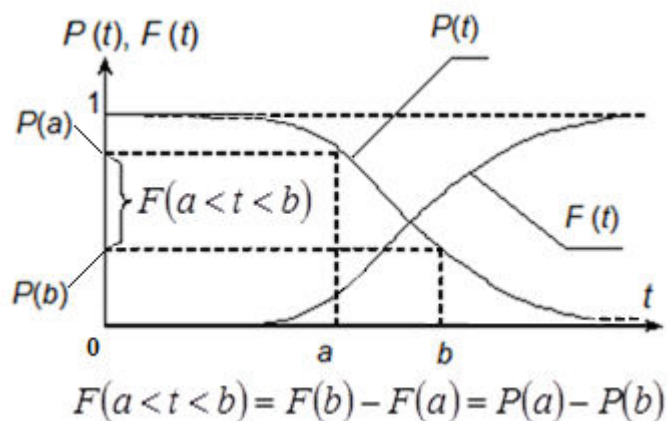


Рис.5.1. Общий вид закона надежности

Вероятность того, что отказ наступит на интервале  $[a, b]$ , равна

$$F(a < t < b) = F(b) - F(a) = P(a) - P(b).$$

Закон надежности можно выразить через безусловную плотность вероятности отказа  $f(t)$  в момент времени  $t$  в соответствии с соотношением (3.13):

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_0^\infty f(t)dt - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt, \quad (5.2)$$

Или, с учетом (3.14), через условную плотность вероятности (интенсивность отказов)  $\lambda(t)$ :

$$P(t) = 1 - F(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \quad (5.3)$$

Соотношение (5.3) называют уравнением связи показателей надежности.

Значение показателя степени функции (5.3) **Н.М. СЕДЯКИН** предложил называть **выработанным за время  $t$  ресурсом надежности  $r(t)$**

$$r(t) = \int_0^t \lambda(\tau)d\tau. \quad (5.4)$$

Ресурс надежности представляет собой безразмерную величину, значение которой может изменяться от нуля до бесконечности и равно степени уменьшения вероятности безотказной работы (ВБР) с ростом наработки. Численно  $r(t_n)$  равен площади под кривой (рис.5.2) интенсивности отказов (параметра потока отказов для восстанавливаемой системы) в пределах наработки  $(0, t_n)$ .

При длительной работе технического объекта в одних и тех же условиях в неизменном режиме условная ВБР в будущем зависит от выработанного ресурса за время  $t$ :

$$P(t, t+\Delta t_n) = e^{-\int_0^{t+\Delta t_n} \lambda(\tau)d\tau} = e^{-[r(0,t+\Delta t_n)-r(0,t)]}. \quad (5.5)$$

Если же режим эксплуатации переменный, то с вычислением вероятности возникают трудности, и эта задача решается специальными методами.

### 5.2.2. Интенсивность отказов

Такое название в теории надежности получила условная плотность  $\lambda(t)$  распределения вероятности наработки невосстанавливаемого объекта до отказа. В соответствии с определением,  $\lambda(t)$  представляет условную



вероятность отказа невосстанавливаемого объекта в момент времени  $t$  при условии, что до этого времени отказа не было. Исходя из соотношений (3.14) и (5.1) можем записать:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1-F(t)} = -\frac{\frac{d[1-F(t)]}{dt}}{1-F(t)} = -\frac{d \ln[1-F(t)]}{dt} = -\frac{d \ln P(t)}{dt}. \quad (5.6)$$

Формула (5.6) соответствует мгновенной интенсивности отказов. Средняя величина на интервале времени  $[t_1, t_2]$  рассчитывается по формуле

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(\tau) d\tau.$$

Понятие интенсивности отказов в соответствии с определением вводится только для невосстанавливаемых объектов, таких как электрическая лампочка, подшипник качения и т.д.

Восстанавливаемые элементы, которыми являются многие элементы электростанций, могут иметь много отказов, после которых происходит восстановление их работоспособности. В непосредственном виде понятие интенсивности отказов для них неприменимо, так как условие, что до момента  $t$  отказов не было, не выполняется. Отказы были, но после восстановления работоспособности оборудование продолжало работать.

Понятие интенсивности отказов для восстанавливаемых объектов имеет смысл в том случае, если объект в перерывах между отказами восстанавливается, а время эксплуатации  $t$  каждый раз начинает отсчитываться с момента последнего включения в работу. Характер изменения интенсивности отказов во времени показан на рис.5.2.

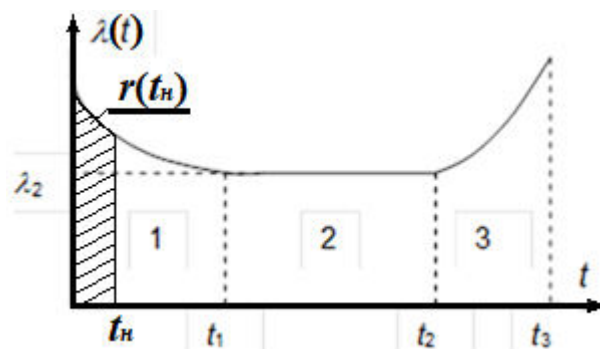


Рис.5.2. Зависимость интенсивности отказов от продолжительности работы (в «жизненном» цикле)

В «жизненном» цикле изделия можно выделить три характерных периода:

- 1) приработки;
- 2) нормальной эксплуатации;
- 3) старения изделия.

В первый период отказы связаны с качеством проектирования, изготовления, монтажа, входного и выходного контроля. Прирабочные отказы объекта устраняются во время пуско-наладочных испытаний, его опытной эксплуатации и в принципе должны быть выявлены и устранены перед сдачей объекта в эксплуатацию. Обычно начинают рассчитывать надежность объекта, начиная с момента  $t_1$ .

На втором этапе отказы связаны с качеством эксплуатации, при этом процессы старения пока не влияют на поведение объекта. Интенсивность отказов остается приблизительно постоянной,  $\lambda(t)=\lambda_2$ .

В момент времени  $t_2$  начинают проявляться процессы старения, интенсивность отказов возрастает. В некоторый момент времени  $t_3$  эксплуатация объекта становится экономически неоправданной из-за увеличения затрат на восстановительные ремонты, оборудование достигает предельного состояния и выводится из работы.

Если известен момент времени  $t_2$  и имеется возможность назначить  $t_3=t_2$ , то для такого объекта можно принять  $\lambda(t)=\lambda_2$ . Для периода  $t > t_2$  такое допущение будет ошибочным. Если расчетчиков устраивает результат с запасом, т.е. с заведомо лучшими фактическими показателями надежности, чем дает расчет, то для этого временного интервала можно также принять  $\lambda(t)=\text{const}$ , но при этом должно быть  $\lambda(t) > \lambda_2$ .

При  $\lambda=\text{const}$  получается наиболее простой, экспоненциальный закон надежности объекта:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (5.7)$$

Здесь  $\lambda$  выступает в виде параметра распределения (плотность распределения отказов).

### 5.2.3. Средняя наработка до отказа

Это математическое ожидание случайной величины  $t$  – продолжительности работы до первого отказа. Зная закон надежности, можно найти значение средней наработки:

$$T_1 = T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t d[1 - F(t)].$$

Интегрируя полученное соотношение по частям, получим окончательно:

$$T_1 = T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (5.8)$$

На рис.5.3. приведена геометрическая интерпретация средней наработки до отказа.

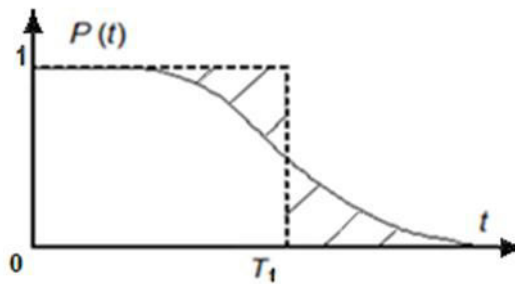


Рис.5.3. Схема определения средней наработки до отказа

Величина  $T_1$  есть такое значение  $t$ , при котором площадь прямоугольника с высотой 1 и основанием  $T_1$  равна площади под кривой закона надежности. Для этого заштрихованные площади должны совпадать. В том случае, если используется экспоненциальный закон надежности при  $\lambda = \text{const}$ , значение  $T_1$  определяется из выражения

$$T_1 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} d(\lambda t) = \frac{1}{\lambda}. \quad (5.9)$$

Здесь интенсивность отказов  $\lambda$  выступает в качестве параметра закона надежности. Аппроксимация экспоненциальным распределением закона надежности очень удобна. Среднюю наработку до отказа можно оценить эмпирически по формуле

$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (5.10)$$

где  $T_i$  – продолжительность работы до отказа  $i$ -го объекта;  $n$  – количество однотипных элементов, за которыми проводится наблюдение.

Величину  $T_1$  можно также определить по экспертным оценкам, ориентируясь на опыт и справочные данные. Если объект является невосстанавливаемым, то средняя наработка до отказа является также характеристикой долговечности. Вопрос об аппроксимации закона экспоненциальным распределением решается с учетом допустимых погрешностей при таком расчете.

#### 5.2.4. Гамма-процентная наработка до отказа

Это наработка, в течение которой отказ не возникает с вероятностью  $\gamma$ . Эта характеристика поясняется на рис.5.4.

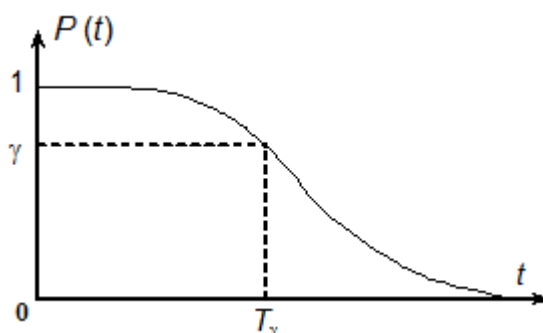


Рис.5.4. Схема определения гамма-процентной наработки до отказа

Согласно определению, величина  $T_\gamma$  определяется из условия  $P(T_\gamma) = \gamma$ . Если известна плотность распределения наработки объекта до отказа  $f(t)$ , то значения  $\gamma$  и  $T_\gamma$  связаны зависимостью:

$$\int_0^{T_\gamma} f(t) dt = F(T_\gamma) = 1 - P(T_\gamma) = 1 - \gamma,$$

Откуда

$$\gamma = 1 - \int_0^{T_\gamma} f(t) dt = \int_{T_\gamma}^{\infty} f(t) dt. \quad (5.11)$$

Медианная наработка до отказа  $T_{0,5}$  определяется по этой формуле при условии  $\gamma = 0,5$ .

### 5.2.5. Параметр потока отказов

По аналогии с интенсивностью отказов невосстанавливаемых объектов показателем безотказности восстанавливаемых объектов является параметр потока отказов  $\omega(t)$ . Предполагается, что эксплуатация восстанавливаемого объекта происходит по следующей схеме. В момент времени  $t=0$  объект начинает использоваться по назначению и работает до отказа. После отказа происходит восстановление его работоспособности, и он продолжает работать до следующего отказа. При этом время восстановления объекта не учитывается, восстановление считается мгновенным. Моменты отказов восстанавливаемого объекта на оси суммарной наработки образуют поток отказов.

Мгновенным параметром потока отказов  $\omega(t)$  называется предел, если он существует, отношения среднего числа отказов в малом интервале около момента  $t$  к величине этого интервала.

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[m(t+\Delta t)] - M[m(t)]}{\Delta t}, \quad (5.12)$$

где  $M[m(t+\Delta t)]$ ,  $M[m(t)]$  - математические ожидания отказов "m" объектов (количества отказов) за время  $t$  и  $(t+\Delta t)$ .

Параметр потока отказов может быть найден по эксплуатационным данным в соответствии с формулой

$$\omega(t + \Delta t, t) = \frac{m(\Delta t)}{\Delta t}, \quad (5.13)$$
$$\omega(t + \Delta t) = \frac{m(\Delta t)}{\Delta t}$$

где  $m(\Delta t)$  - количество отказов за интервал наработки  $\Delta t$ .

Среднее значение параметра потока отказов на интервале  $[t_1, t_2]$

$$\bar{\omega}(t_1, t_2) = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \omega(\tau) d\tau.$$

Отсюда среднее число отказов на интервале:

$$m_{cp}(t) = \bar{\omega}(t_1, t_2) * (t_2 - t_1) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau. \quad (5.14)$$

Величина  $\omega(\tau)d\tau$  есть условная вероятность того, что отказ произойдет в интервале  $[t, t+dt]$  при условии, что в момент времени  $t$  отказа не было. Последовательные отказы восстанавливаемых объектов, как правило, независимы, и в момент времени  $t$  происходит только один отказ, два и более отказов невозможны, т.е. поток ординарный. Чаще всего предполагают, что поток отказов представляет собой пуассоновский поток с постоянным параметром, или **простейший** стационарный поток. Это поток событий должен удовлетворять трем свойствам:

- 1) стационарность (среднее число отказов происходящих в единицу времени постоянно,  $\omega = \text{const}$ );
- 2) отсутствие последействия (возникновение одного отказа не влияет на появление последующих);
- 3) ординарность (невозможность возникновения одновременно двух и более отказов).

В общем случае, когда  $\omega(t) \neq \text{const}$ , поток отказов восстанавливаемого оборудования называется пуассоновским с переменным параметром  $\omega(t)$ . Вероятность безотказной работы такого объекта описывается формулой, аналогичной соотношению (5.13):

$$P(t) = e^{-\int_0^t \omega(t) dt}. \quad (5.15)$$

В интервале времени  $0 < t < t_1$  до первого отказа восстанавливаемого объекта параметр потока отказов  $\omega(t)$  естественным образом совпадает с интенсивностью отказов  $\lambda(t)$ ,

$$\omega(t) = \lambda_1(t). \quad (5.16)$$

На следующем интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$  от первого до второго отказа поведение  $\omega(t)$  будет определяться тем, насколько объект в результате ремонта восстановит свою надежность, т.е. приблизится по надежности к своему исходному состоянию  $\lambda_1(t)$ . Возможные варианты изменения параметра потока отказов показаны на рис.5.5.

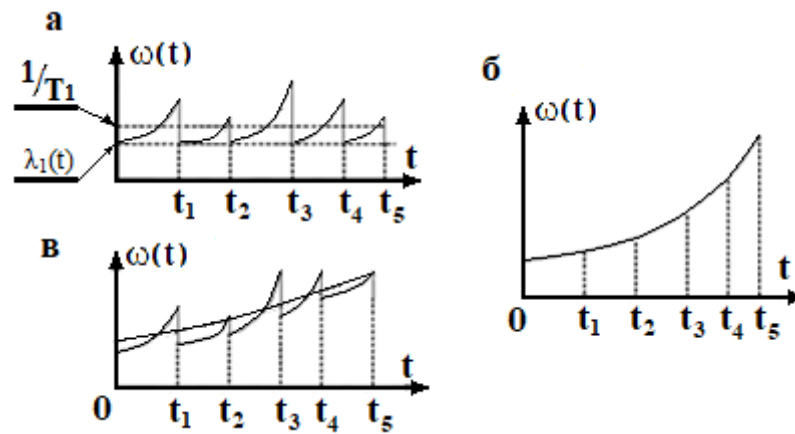


Рис. 5.5. Зависимость параметра потока отказов  $\omega(t)$  от продолжительности эксплуатации и регламента ремонта и восстановления:

- а – полное восстановление надежности при ремонте;
- б – ремонт без восстановления надежности;
- в – частичное восстановление надежности

Одним из предельных случаев является вариант «а», когда объект полностью восстанавливает свою надежность при ремонте после отказа. После восстановления объект на интервале  $[t_1, t_2]$  будет вести себя так же, как на предыдущем интервале  $[0, t_1]$ , т. е. всегда после ремонтов в эксплуатации будет находиться как бы новый по надежности объект. Среднее значение параметра потока отказов в течение всего периода эксплуатации останется постоянным и составит величину  $\omega(t) \approx 1/T_1$ .

Вторым предельным случаем является вариант «б», при котором восстановление работоспособности объекта не изменяет его надежности и, следовательно, не снижает значения параметра потока отказов. Интенсивность отказов продолжает возрастать, соответствуя ситуации, когда не было отказов и последующих за ними восстановления работоспособности.

Вариант «в» занимает промежуточное положение, отражая ситуацию, когда при ремонте происходит частичное восстановление надежности оборудования. Интенсивность отказов возрастает по пунктирной кривой несколько медленнее, чем при варианте «б».

Если закон надежности объекта имеет экспоненциальное распределение, т.е. соответствует варианту «а» с постоянным для любого  $t$  параметром  $\lambda$ , то для такого объекта и  $\omega(t) = \omega = \lambda$ . Среднее число отказов за наработку  $t$  составит величину:

$$m_{cp}(t) = \omega \cdot t = \lambda \cdot t. \quad (5.17)$$

### 5.2.6. Средняя наработка на отказ

Это показатель безотказности восстанавливаемого объекта, численно равный отношению наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

$$T_0 = \frac{t}{m_{cp}(t)} = \frac{t}{\int_0^t \omega(t) dt} = \frac{1}{\bar{\omega}}, \quad (5.18)$$

где  $\bar{\omega}$  - средний на интервале  $t$  параметр потока отказов  $\omega(t)$ . Если при ремонте объекта его работоспособность восстанавливается полностью, то средняя наработка на отказ будет равна средней наработке до отказа:

$$T_0 = T_1. \quad (5.19)$$

Для экспоненциального закона надежности средняя наработка на отказ составит величину  $T_0 = 1/\lambda$ .

## ТЕМА 6. Характеристики ремонтпригодности и долговечности элементов технических систем

### 6.1. Показатели ремонтпригодности

Как следует из номенклатуры показателей надежности, приведенной в табл. 1.1. первого раздела, основными показателями ремонтпригодности являются *вероятность восстановления, интенсивность восстановления и среднее время восстановления* отказа изделия. Названные характеристики восстановления отказов изделия определяются законом восстановления.

#### 6.1.1. Закон восстановления объекта

Этот закон представляет собой вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит величины  $t$ . Очевидно, что  $P_e(0) = 0$ ,  $P_e(\infty) = 1$ . Закон восстановления объекта



соответствует функции распределению времени восстановления объекта после отказа:

$$P_g(t) = F_g(t). \quad (6.1)$$

Если известна плотность распределения времени восстановления объекта, то можем записать:

$$P_g(t) = \int_0^t f_B(t) dt, \quad (6.2.)$$

Часто для описания времени восстановления как случайной величины используется экспоненциальное распределение, для которого функция распределения и плотность распределения приведены в разделе 4.2. Напомним, что это однопараметрический закон, имеющий функцию распределения вероятности восстановления изделия  $F_g(t)$ :

$$F_g(t) = P_g(t) = 1 - e^{-\mu_0 t}, \quad (6.3)$$

плотность распределения вероятности восстановления  $f(t)$ :

$$f_B(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \mu_0 e^{-\mu_0 t}, \quad (6.4)$$

условную плотность распределения (интенсивность потока восстановлений изделия)  $\mu(t)$ :

$$\mu(t) = \frac{f_B(t)}{1-F(t)} = \frac{\mu_0 e^{-\mu_0 t}}{1-(1-e^{-\mu_0 t})} = \mu_0. \quad (6.5)$$

Закон определен для случайной величины  $t > 0$  (время восстановления) с параметром распределения  $\mu > 0$ . Разумеется, что для экспоненциального распределения  $\mu_0 = \text{const} > 0$ .

Тогда математическое ожидание  $m_t$  случайной величины  $t$  - времени восстановления составит значение:

$$m_t = \int_0^{\infty} t \mu_0 e^{-\mu_0 t} dt = \frac{1}{\lambda_0}.$$

Дисперсия  $D_t$ :

$$D_t = \int_0^{\infty} \left(t - \frac{1}{\mu_0}\right)^2 \mu_0 e^{-\mu_0 t} dt = \frac{1}{\mu_0^2}.$$

По этому закону, как правило, распределяется также случайная величина – продолжительность работы оборудования до отказа, если его отказы не связаны со старением, т.е. износом оборудования, ухудшением

определяющих его работоспособность характеристик. Это распределение наблюдается, когда отказы вызываются случайными внешними факторами, например, колебаниями тепловой, электрической или механической нагрузок, изменением качества топлива, особенностями работы различных операторов или другими случайными воздействиями.

### 6.1.2. Интенсивность восстановления

Интенсивностью восстановления  $\mu(t)$  называется условная плотность распределения времени восстановления при условии, что до момента  $t$  восстановление не закончено. Так как продолжительность восстановления  $t_g$  обычно много меньше продолжительности работы  $t$ , то на практике чаще всего для аппроксимации интенсивности восстановления принимают, как отмечалось выше, экспоненциальный закон распределения с постоянным параметром  $\mu$ :

$$P_g(t) = F_g(t) = 1 - e^{-\mu t},$$

$$f_B(t) = \frac{dF_B(t)}{dt} = \mu e^{-\mu t}.$$

Однако в общем случае  $\mu = \mu(t) \neq \text{const}$ , тогда:

$$P_g(t) = F_g(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt}, \quad (6.6)$$

$$f_B(t) = \frac{dF_B(t)}{dt} = \mu e^{-\int_0^t \mu(t) dt}. \quad (6.7)$$

Таким образом, для определения вероятности восстановления при экспоненциальном законе распределения времени восстановления, имеем индивидуальные для  $\mu_0$  базовые соотношения (6.3) и (6.4). В общем случае, при переменном значении интенсивности восстановления  $\mu = \mu(t) \neq \text{const}$ , пользуемся общими соотношениями (6.6) и (6.7)

### 6.1.3. Среднее время восстановления

Это математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта:

$$T_g = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt \quad (6.8)$$

Или:

$$T_{\epsilon} = \int_0^{\infty} t \frac{dF_B(t)}{dt} dt = \int_0^{\infty} t dF_B(t) = - \int_0^{\infty} t d[1 - F_B(t)].$$

После интегрирования последнего соотношения по частям, получим:

$$T_{\epsilon} = - t [1 - F_B(t)]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} [1 - F_B(t)] dt = \int_0^{\infty} [1 - P_B(t)] dt. \quad (6.9)$$

Для экспоненциального закона можем записать:

$$P_{\epsilon}(t) = F_{\epsilon}(t) = 1 - e^{-\mu t}, \quad (6.10)$$

Тогда получим среднее время восстановления в виде соотношения:

$$T_{\epsilon} = \int_0^{\infty} e^{-\mu t} dt = - \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} e^{-\mu t} d(-\mu t) = \frac{1}{\mu}. \quad (6.11)$$

В теплоэнергетике для некоторых элементов оборудования помимо чистого времени восстановительного ремонта необходимо дополнительное время, например, на расхолаживание топочной камеры или охлаждение фланцев корпуса турбины. В ядерной энергетике требуется выдержка времени для снижения ионизирующего излучения до допустимого уровня и проведения дезактивации. Поэтому иногда вместо термина среднее время восстановления используется термин среднее время простоя, вызванного отказом. Эти два термина равноправны и имеют один и тот же смысл.

## 6.2. Показатели долговечности

Основными единичными показателями долговечности, как следует из номенклатуры показателей надежности, приведенной в табл. 1.1. первого раздела, являются различные виды ресурса и срока службы изделия:

- средний ресурс;
- гамма-процентный ресурс;
- назначенный ресурс;
- установленный ресурс;
- средний срок службы;
- гамма-процентный срок службы;
- назначенный срок службы;
- установленный срок службы.

Приведем здесь общие определения понятий *ресурса* и *срока службы* на основе определения категории предельного состояния объекта, приведенного в разделе 1.2.

**Ресурсом** называется наработка объекта, т.е. чистое время эксплуатации без учета времени простоев и ремонтов до достижения предельного состояния объекта.

**Сроком службы** называется календарная продолжительность эксплуатации оборудования до достижения предельного состояния, включая продолжительность простоев и ремонтов.

Понятие «ресурс» характеризует долговечность, по наработке изделия циклы, километры и т.д.), а «срок службы» - по календарному времени.

### **6.2.1. Закон долговечности объекта**

Закон долговечности представляет собой вероятность того, что предельное состояние объекта наступит не ранее некоторого момента времени  $t$ , так как предполагается, что оборудование эксплуатируется до наступления предельного состояния, т.е. до такого состояния, когда использование его по назначению невозможно или экономически невыгодно, или восстановление его работоспособности технически невозможно или экономически нецелесообразно.

Как было отмечено выше, закон долговечности определяет вероятность  $P_d(t)$  того, что предельное состояние объекта наступит не ранее момента времени  $t$ . По определению закон долговечности зависит от функции распределения случайной величины  $t_d$ , соответствующей ресурсу или сроку службы объекта. Общий вид закона долговечности приведен на рис. 6.1.

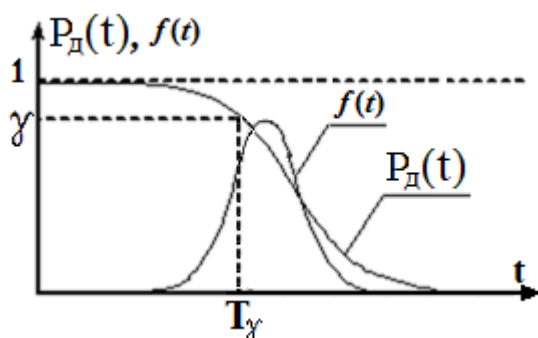


Рис. 6.1. Общий вид закона долговечности

По оси абсцисс откладывается время достижения предельного состояния (ресурс, или срок службы), по оси ординат - вероятность возможности эксплуатации объекта. Очевидно, что  $P_d(0) = 1$ ,  $P_d(\infty) = 0$ .

Для невосстанавливаемых объектов, которые после первого отказа переходят в предельное состояние, закон долговечности совпадает с законом надежности, т.е.  $P_d(t) = P(t)$ .

Многие виды энергетического оборудования рассчитываются на срок службы около 25-30 лет. Так как ресурс оборудования  $T_p$  и срок службы  $T_c$  зависят от влияния многих факторов, то естественно можно ожидать, что величина  $[1 - P_d(t)]$  будет иметь распределение, близкое к распределению нормального закона Гаусса. Плотность распределения должна иметь колоколообразный вид, причем максимум плотности должен соответствовать значению  $t = 25 - 30$  лет.

### 6.2.2. Средний ресурс и средний срок службы оборудования

Это математические ожидания времени достижения объектом своего предельного состояния. При известном законе долговечности эти величины рассчитываются по формулам:

$$T_p = \int_0^{\infty} P_d(t_p) dt_p, \quad (6.12)$$

$$T_c = \int_0^{\infty} P_d(t_c) dt_c. \quad (6.13)$$

Если законы долговечности  $P_d(t_p)$  и  $P_d(t_c)$  неизвестны, то средние значения  $T_p$  и  $T_c$  могут быть найдены по экспериментальным данным:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_{p,i}}{n}, \quad (6.14)$$

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^n t_{c,i}}{n}, \quad (6.15)$$

где  $t_{p,i}$ ,  $t_{c,i}$  – время достижения  $i$ -м объектом предельного состояния;  $n$  – количество наблюдаемых объектов одинаковой конструкции и работающих приблизительно в одинаковых условиях.

Следует обратить внимание на то, что для анализа характеристик надежности объекты должны наблюдаться в течение всего срока эксплуатации, т.е. как минимум в течение 25...30 лет. Поэтому количество результатов достижения предельного состояния бывает очень ограниченным, а найденные характеристики будут соответствовать только уже физически и морально устаревшим образцам оборудования.

### 6.2.3. Гамма-процентные ресурс и срок службы

Это значения ресурса  $T_{p,\gamma}$  и срока службы  $T_{c,\gamma}$ , при которых с вероятностью  $\gamma$  объект не достигает предельного значения.

$$P_{\partial}(T_{p,\gamma}) = \gamma, \quad (6.16)$$

$$P_c(T_{c,\gamma}) = \gamma. \quad (6.17)$$

### 6.2.4. Назначенные ресурс и срок службы оборудования

Для некоторых ответственных типов оборудования, например, главных паропроводов, достижение предельного состояния недопустимо из-за больших потерь, связанных с ликвидацией аварий. В этом случае могут устанавливаться так называемые назначенные показатели долговечности. Это такие значения ресурса  $T_{рн}$  и срока службы  $T_{сн}$ , при достижении которых применение объекта должно быть прекращено независимо от его состояния.

**Назначенный ресурс** - суммарная наработка, при достижении которой применение изделия по назначению должно быть прекращено независимо от его технического состояния. Кроме того, предприятие-изготовитель, а также ремонтное предприятие могут установить *гарантийный ресурс*, в течение которого гарантируется выполнение установленных требований к объекту (при соблюдении правил его эксплуатации, хранения и транспортировки).

Все виды ресурса измеряются в единицах наработки, чаще всего - в единицах времени.

**Назначенный срок службы** – представляет собой суммарную календарную продолжительность эксплуатации, при достижении которой применение изделия по назначению должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

Назначенные величины выбираются по аналогии с определением гамма-процентных значений ресурса и срока службы для очень высокой вероятности  $\gamma = 1$ . При достижении назначенных показателей долговечности  $T_{рн}$  и  $T_{сн}$  объект практически со 100 % вероятностью не достигнет предельного состояния.

Все виды ресурса измеряются в единицах наработки, чаще всего - в единицах времени.

#### **6.2.5. Установленные ресурс и срок службы оборудования**

Под *установленным ресурсом* понимается технически обоснованная или заданная величина ресурса, обеспечиваемая конструкцией, технологией и условиями эксплуатации, в пределах которой изделие не должно достигать предельного состояния.

Под *установленным сроком службы* следует понимать технико-экономически обоснованный или заданный срок службы, обеспечиваемый конструкцией, технологией и эксплуатацией, в пределах которого объект не должен достигать предельного состояния.

### **6.3. Комплексные показатели надежности**

Каждый из рассмотренных выше показателей характеризует только одну составляющую надежности: безотказность, ремонтпригодность или долговечность. Существует несколько показателей, которые отражают суммарные характеристики.

#### **6.3.1. Коэффициент готовности объекта**

Это комплексный показатель надежности, характеризующий готовность объекта к работе в интервале времени между плановыми

остановами объекта, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, например, остановками объекта на плановый ремонт, модернизацию, вывод в консервацию.

Коэффициент готовности представляет собой вероятность, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта не предусматривается. Коэффициент готовности рассчитывается по формуле

$$K_z = \frac{t_{раб}}{t_{раб} + t_{восс}^{аб}} = 1 - \frac{t_{восс}^{аб}}{t_{раб} + t_{восс}^{аб}}. \quad (6.18)$$

где  $t_{раб}$  - период работоспособности;  $t_{восс}^{аб}$  - период простоев, связанных с неплановыми ремонтами, осуществляемыми для ликвидации отказов объекта.

Следует отметить, что во время  $t_{раб}$  входит также продолжительность нахождения объекта в резерве. Коэффициент готовности является основным показателем надежности для восстанавливаемых объектов непрерывного действия, выходной эффект от применения которых пропорционален суммарной продолжительности пребывания в работоспособном состоянии.

Коэффициент готовности удобен при проведении расчетов и для сравнения.

Различают стационарный и нестационарный, а также средний коэффициенты готовности и простоя. На практике, как правило, используются стационарные коэффициенты. В стационарном режиме коэффициент готовности имеет двоякую интерпретацию. С одной стороны – вероятность того, что в произвольный момент времени объект окажется в работоспособном состоянии, с другой – математическое ожидание доли времени нахождения объекта в работоспособном состоянии

Для режима эксплуатации, когда средняя наработка на отказ не меняется в течение эксплуатации ( $T_0 = const$ ), коэффициент готовности равен

$$K_z = \frac{T_0}{T_0 + t_{восс}^{аб}}. \quad (6.19)$$

Для энергетических установок, у которых возможны частичные отказы, приводящие к частичным снижениям располагаемой мощности ниже



номинального уровня мощности, иногда рассматривают коэффициент готовности оборудования относительно фиксированного уровня мощности.

Так, коэффициент готовности  $K_{гн}$  относительно номинального уровня мощности  $N_n$  представляет собой вероятность того, что установка будет работать с располагаемой мощностью не ниже номинальной в произвольный момент времени, кроме планируемых остановов. Аналогично коэффициент готовности установки  $K_{гч}$  относительно частичного уровня мощности  $N_ч$  есть вероятность того, что располагаемая мощность установки в периоды между плановыми остановами будет не ниже, чем  $N_ч$ . В этих случаях

$$K_{гн} = \frac{t_{раб}^н}{t_{раб}^н + t_{восс}^{аб}}, \quad K_{гч} = \frac{t_{раб}^ч}{t_{раб}^ч + t_{восс}^{аб}}, \quad K_{гн} \leq K_{гч}. \quad (6.20)$$

### 6.3.2. Коэффициент оперативной готовности

Это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени. Коэффициент оперативной готовности обозначают  $K_{о.г}(t_{б.р})$ , где  $t_{б.р}$  – длительность заданного интервала времени, в течение которого требуется безотказная работа. При  $t_{б.р} > 0$

$$K_{о.г}(t_{б.р}) < K_{г}.$$

Из вероятностного определения следует, что

$$K_{о.г} = K_{г} * P(t). \quad (6.21)$$

Только в начальный момент включения после ремонта оборудования из вероятностного определения следует, что  $K_{о.г} = K_{г}$ .

Коэффициент оперативной готовности реже используется на практике, поскольку его определение требует знания значения  $t_{б.р}$ , а оно может меняться в зависимости от условий работы или вовсе быть неизвестно.

### 6.3.3. Коэффициент технического использования объекта

Этот коэффициент представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном

состоянии  $t_{раб}$  за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Он характеризует долю времени пребывания объекта в работоспособном состоянии по отношению ко всему рассматриваемому календарному сроку  $t_{кал}$ , включающему периоды работоспособности  $t_{раб}$  и простоев, связанных как с плановыми ремонтами и техническим обслуживанием  $t_{восс}^{пл}$ , так и неплановыми ремонтами  $t_{восс}^{аб}$ , осуществляемыми для ликвидации отказов объекта:

$$K_{ми} = \frac{t_{раб}}{t_{кал}} = \frac{t_{раб}}{t_{раб} + t_{восс}^{аб} + t_{восс}^{пл}}. \quad (6.22)$$

Для установки, которая может иметь частичные плановые разгрузки и частичные отказы, величина  $t_{раб}$  рассчитывается как сумма интервалов, в течение которых установка работает как с полной, так и частичной нагрузками:

$$t_{раб} = \sum_1^B t_i^{ном} + \sum_1^C t_i^{част}. \quad (6.23)$$

В отдельных литературных источниках коэффициент технического использования определяется соотношением:

$$K_{ти} = t_H / (t_H + t_в + t_p + t_o), \quad (6.24)$$

где  $t_H$  — суммарная наработка изделия в рассматриваемый промежуток времени;  $t_в$ ,  $t_p$  и  $t_o$  — соответственно, суммарное время, затраченное на восстановление, ремонт и техническое обслуживание изделия за тот же период времени.

Одним из важнейших вопросов обеспечения эффективности функционирования технического изделия является повышение характеристик его надежности.

Рассмотрим далее общие вопросы повышения надежности посредством резервирования объектов и элементов технических систем.

## **ТЕМА 7. Резервирование технических систем. Общие методы обеспечения надёжности сложных систем**

### **7.1. Основные понятия резервирования**

**Резервирование** - метод повышения надёжности объекта введением дополнительных элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых для нормального выполнения объектом заданных функций. В этом случае отказ наступает только после отказа основного элемента и всех резервных элементов.

Систему можно представить из ряда ступеней, выполняющих отдельные функции. Задача резервирования состоит в нахождении такого числа резервных образцов оборудования на каждой ступени, которое будет обеспечивать заданный уровень надёжности системы при наименьшей стоимости.

Выбор наилучшего варианта зависит главным образом от того увеличения надёжности, которое можно достичь при заданных расходах.

**Основной элемент** - элемент основной физической структуры объекта, минимально необходимой для нормального выполнения объектом его задач.

**Резервный элемент** - элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

#### **Виды резервирования**

**Структурное (элементное) резервирование** - метод повышения надёжности объекта, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта. Обеспечивается подключением к основной аппаратуре резервной таким образом, чтобы при отказе основной аппаратуры резервная продолжала выполнять ее функции.

**Резервирование функциональное** - метод повышения надёжности объекта, предусматривающий использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных и наряду с ними.

**Временное резервирование** - метод повышения надёжности объекта, предусматривающий использование избыточного времени, выделенного для

выполнения задач. Другими словами, временное резервирование - такое планирование работы системы, при котором создается резерв рабочего времени для выполнения заданных функций. Резервное время может быть использовано для повторения операции, либо для устранения неисправности объекта.

**Информационное резервирование** - метод повышения надёжности объекта, предусматривающий использование избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения задач.

**Нагрузочное резервирование** - метод повышения надёжности объекта, предусматривающий использование способности его элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных.

С позиций расчёта и обеспечения надёжности технических систем необходимо рассматривать структурное резервирование.

### Способы структурного резервирования

По способу подключения резервных элементов и устройств различают следующие способы резервирования (рис. 7.1).



Рис. 7.1 Классификация способов структурного резервирования

Резервирование раздельное (поэлементное) с постоянным включением резервных элементов показано на рис.7.2.

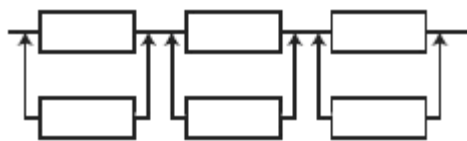


Рис. 7.2 Резервирование раздельное с постоянным включением резервных элементов

Такое резервирование возможно тогда, когда подключение резервного элемента несущественно изменяет рабочий режим устройства. Достоинство его - постоянная готовность резервного элемента, отсутствие затраты времени на переключение. Недостаток - резервный элемент расходует свой ресурс так же, как основной элемент.

Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента одним резервным элементом (рис. 7.3) - это такой способ резервирования, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

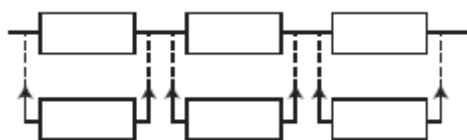


Рис. 7.3 Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента

В этом случае резервный элемент находится в разной степени готовности к замене основного элемента. Достоинство этого способа - резервный элемент сохраняет свой рабочий ресурс либо может быть использован для выполнения самостоятельной задачи. Рабочий режим основного устройства не искажается. Недостаток - необходимость затрачивать время на подключение резервного элемента. Резервных элементов может быть меньше, чем основных.

Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых называется кратностью резервирования -  $m$ . При резервировании с целой

кратностью величина  $m$  есть целое число, при резервировании с дробной кратностью величина  $m$  есть дробное несокращаемое число. Например,  $m=4/2$  означает наличие резервирования с дробной кратностью, при котором число резервных элементов равно четырём, число основных - двум, а общее число элементов равно шести. *Сокращать дробь нельзя*, так как если  $m=4/2=2/1$ , то это означает, что имеет место резервирование с целой кратностью, при котором число резервных элементов равно двум, а общее число элементов равно четырём.

**При включении резерва по способу замещения резервные элементы до момента включения в работу могут находиться в трёх состояниях:**

- нагруженном («горячем») резерве;
- облегченном («тёплом») резерве;
- ненагруженном («холодном») резерве.

**Нагруженный** («горячий») резерв - резервный элемент, находящийся в том же режиме, что и основной.

**Облегченный** («тёплый») резерв - резервный элемент, находящийся в менее нагруженном режиме, чем основной.

**Ненагруженный** («холодный») резерв - резервный элемент, практически не несущий нагрузок.

Резервирование общее с постоянным подключением, (рис. 7.4а). либо с замещением (рис. 7.4б). В этом случае резервируется объект в целом, а в качестве резервного - используется аналогичное сложное устройство. Этот способ менее экономичен, чем отдельное резервирование. При отказе, например, первого основного элемента возникает необходимость подключать всю технологическую резервную цепочку.

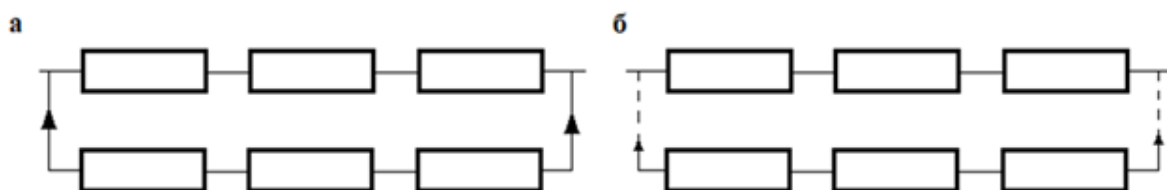


Рис. 7.4. Резервирование общее

Резервирование мажоритарное ("голосование"  $n$  из  $m$  элементов) (рис. 7.5). Этот способ основан на применении дополнительного элемента - его называют мажоритарный или логический или кворум-элемент. Он позволяет вести сравнение сигналов, поступающих от элементов, выполняющих одну и ту же функцию. Если результаты совпадают, тогда они передаются на выход устройства. На рис. 7.5 изображено резервирование по принципу голосования "два из трёх", т.е. любые два совпадающих результата из трёх считаются истинными и проходят на выход устройства. Можно применять соотношения три из пяти и др. Главное достоинство этого способа - обеспечение повышения надёжности при любых видах отказов работающих элементов. Любой вид одиночного отказа элемента не окажет влияния на выходной результат. Эффективно в системах управления процессами.

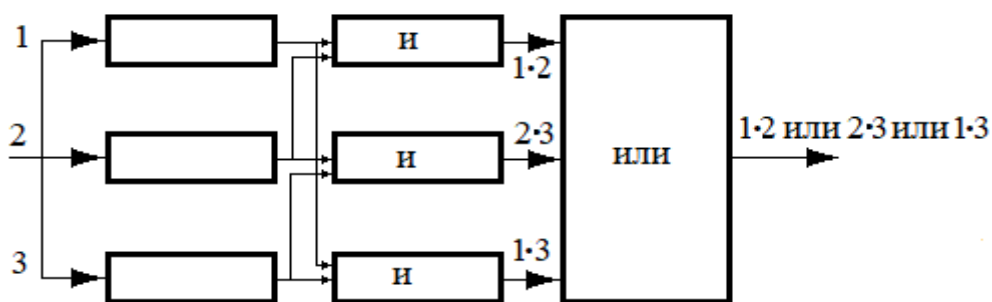


Рис. 7.5. Резервирование мажоритарное

## 7.2. Типовые структуры расчета надёжности

Под структурной схемой надёжности понимается наглядное представление (графическое или в виде логических выражений) условий, при которых работает или не работает исследуемый объект (система, устройство, технический комплекс и т.д.). Типовые структурные схемы представлены на рис. 7.6.

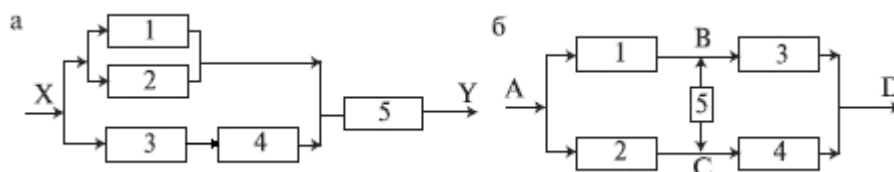


Рис. 7.6. Типовые структуры расчёта надёжности

Простейшей формой структурной схемы надёжности является параллельно-последовательная структура. На ней параллельно соединяются элементы, совместный отказ которых приводит к отказу. В последовательную цепочку соединяются такие элементы, отказ любого из которых приводит к отказу объекта.

На рис. 7.6а представлен вариант параллельно-последовательной структуры. По этой структуре можно сделать следующее заключение. Объект состоит из пяти частей. Отказ объекта наступает тогда, когда откажет или элемент 5, или узел, состоящий из элементов 1-4. Узел может отказаться тогда, когда одновременно откажет цепочка, состоящая из элементов 3,4, и узел, состоящий из элементов 1,2. Цепь 3-4 отказывает, если откажет хотя бы один из составляющих ее элементов, а узел 1,2 - если откажут оба элемента, т.е. элементы 1,2. Расчёт надёжности при наличии таких структур отличается наибольшей простотой и наглядностью.

В тех случаях, когда условие работоспособности не удаётся представить в виде простой параллельно-последовательной структуры используют или логические функции, или графы и ветвящиеся структуры, по которым оставляются системы уравнений работоспособности.

### **7.2.1. Расчёт надёжности, основанный на использовании параллельно-последовательных структур**

На рис. 7.7 представлено параллельное соединение элементов 1, 2, 3. Это означает, что устройство, состоящее из этих элементов, переходит в состояние отказа после отказа всех элементов при условии, что все элементы системы находятся под нагрузкой, а отказы элементов статистически независимы.

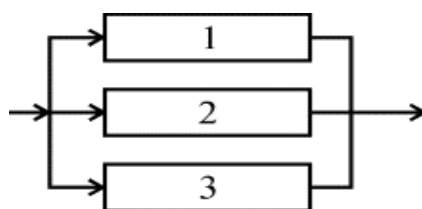


Рис. 7.7. Блок-схема системы с параллельным соединением элементов



Условие работоспособности устройства можно сформулировать следующим образом: устройство работоспособно, если работоспособен элемент 1 или элемент 2, или элемент 3, или элементы 1 и 2, 1; и 3, 2; и 3, 1; и 2; и 3.

Вероятность безотказного состояния устройства, состоящего из  $n$  параллельно соединённых элементов, определяется по теореме сложения вероятностей совместных случайных событий как

$$P_c = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i),$$

т.е. при параллельном соединении независимых (в смысле надёжности) элементов их ненадёжности ( $Q_i = 1 - P_i$ ) перемножаются.

Интенсивность отказов (при интенсивности отказов элементов  $\lambda_i$ ), определяется как

$$\lambda_c = \frac{dQ(t)dt}{P(t)} = \frac{n * \lambda_i * Q(t)^n}{P(t)^n}.$$

В случае, когда интенсивности отказов всех элементов одинаковы, среднее время безотказной работы системы  $T_0$

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} * \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}.$$

### 7.2.2. Включение резервного оборудования системы замещением

В данной схеме включения  $n$  одинаковых образцов оборудования только один находится все время в работе (рис. 7.8). Когда работающий образец выходит из строя, его непременно отключают, и в работу вступает один из резервных (запасных) элементов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все резервные образцы не будут исчерпаны.

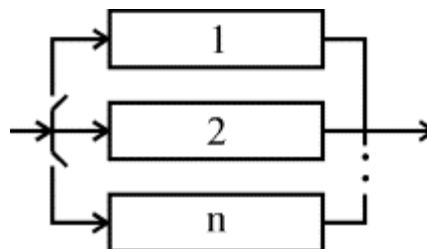


Рис. 7.8. Блок-схема системы включения резервного оборудования замещением

Примем для этой системы следующие допущения:

1. Отказ системы происходит, если откажут все  $n$  элементов.
2. Вероятность отказа каждого образца оборудования не зависит от состояния остальных  $(n-1)$  образцов (отказы статистически независимы).
3. Отказывать может только оборудование, находящееся в работе, и условная вероятность отказа в интервале  $(t, t+dt)$  равна  $\lambda dt$ ; запасное оборудование не может выходить из строя до того, как оно будет включено в работу.
4. Переключающие устройства считаются абсолютно надёжными.
5. Все элементы идентичны. Резервные элементы имеют характеристики как новые.

Система способна выполнять требуемые от нее функции, если исправен по крайней мере один из  $n$  образцов оборудования. В этом случае при экспоненциальном законе и «холодном» резерве надёжность равна просто сумме вероятностей состояний системы, исключая состояние отказа, т.е.

$$P_c(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!}$$

$m$  – кратность резервирования.

$$T_c = T_0 (m + 1),$$

где  $\lambda$  и  $T_0$  – интенсивность отказов и средняя наработка до первого отказа основного устройства.

При «горячем» резерве

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda t}]^{m+1}, \quad T_c = T_0 \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1}.$$

### **7.3. Методы обеспечения надёжности сложных систем**

#### **7.3.1. Конструктивные способы обеспечения надёжности**

Одной из важнейших характеристик сложных технических систем является их надёжность. Требования к количественным показателям надёжности возрастают тогда, когда отказы технической системы приводят к большим затратам материальных средств либо угрожают безопасности (например, при создании атомных лодок, самолётов или изделий военной

техники). Один из разделов технического задания на разработку системы - раздел, определяющий требования к надёжности. В этом разделе указывают количественные показатели надёжности, которые необходимо подтверждать на каждом этапе создания системы.

На этапе разработки технической документации, являющейся комплектом чертежей, технических условий, методик и программ испытаний, выполнение научно-исследовательских расчётов, подготовки эксплуатационной документации и обеспечение надёжности осуществляют способами рационального проектирования и расчётно-экспериментальными методами оценки надёжности.

Существует несколько методов, с помощью которых можно повысить конструктивную надёжность сложной технической системы. Конструктивные методы повышения надёжности предусматривают создание запасов прочности металлоконструкций, облегчение режимов работы электроавтоматики, упрощение конструкции, использование стандартных деталей и узлов, обеспечение ремонтпригодности, обоснованное использование методов резервирования.

Анализ и прогнозирование надёжности на стадии проектирования даёт необходимые данные для оценки конструкции. Такой анализ проводят для каждого варианта конструкции, а также после внесения конструктивных изменений. При обнаружении конструктивных недостатков, снижающих уровень надёжности системы, проводят конструктивные изменения и корректируют техническую документацию.

### **7.3.2. Технологические способы обеспечения надёжности технических изделий в процессе изготовления**

Одним из основных мероприятий на стадии серийного производства, направленных на обеспечение надёжности технических систем, является стабильность технологических процессов. Научно обоснованные методы управления качеством продукции позволяют своевременно давать заключение о качестве выпускаемых изделий. На предприятиях

промышленности применяют два метода статистического контроля качества: текущий контроль технологического процесса и выборочный метод контроля.

Метод статистического контроля (регулирования) качества позволяет своевременно предупреждать брак в производстве и, таким образом, непосредственно вмешиваться в технологический процесс.

Выборочный метод контроля не оказывает непосредственного влияния на производство, так как он служит для контроля готовой продукции, позволяет выявить объём брака, причины его возникновения в технологическом процессе или же качественные недостатки материала.

Анализ точности и стабильности технологических процессов позволяет выявить и исключить факторы, отрицательно влияющие на качество изделия. В общем случае, контроль стабильности технологических процессов можно проводить следующими методами: графоаналитическим с нанесением на диаграмму значений измеряемых параметров; расчётно-статистическим для количественной характеристики точности и стабильности технологических процессов; а также прогнозирования надёжности технологических процессов на основе количественных характеристик приведенных отклонений.

### **7.3.3. Обеспечение надёжности технических систем в условиях эксплуатации**

Надёжность технических систем в условиях эксплуатации определяется рядом эксплуатационных факторов, таких как, квалификация обслуживающего персонала, качество и количество проводимых работ по техническому обслуживанию, наличие запасных частей, использование измерительной и проверочной аппаратуры, а также наличие технических описаний и инструкций по эксплуатации.

В первом приближении можно принять, что все отказы, возникающие в процессе эксплуатации, являются независимыми. Поэтому надёжность всей системы при предположении независимости отказов равна:

$$P = P_1 * P_2 * P_3,$$

где  $P_1, P_2, P_3$  - вероятности безотказной работы системы, соответственно, по непрогнозируемым внезапным отказам, внезапным отказам, которые могут быть предотвращены при своевременном техническом обслуживании, и постепенным отказам.

Одной из причин отсутствия отказов элементов системы является качественное техническое обслуживание, которое направлено на предотвращение прогнозируемых внезапных отказов. Вероятность безотказной работы системы  $P_{об}$ , обусловленная качеством обслуживания, равна:

$$P_{об} = \prod_{i=1}^n P_i^{об},$$

где  $P_i^{об}$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента, связанная с техническим обслуживанием.

По мере совершенствования обслуживания значение вероятности безотказной работы  $P_{об}$  приближается к единице.

Замена элементов с возрастающей во времени интенсивностью отказов возможна во всех сложных технических системах. С целью уменьшения во времени интенсивности отказов вводят техническое обслуживание системы, которое позволяет обеспечить поток отказов у сложных систем с конечной интенсивностью в течение заданного срока эксплуатации, т.е. сделать близким к постоянному.

В процессе эксплуатации при техническом обслуживании интенсивность отказов системы, с одной стороны, имеет тенденцию к увеличению, а с другой стороны, - тенденцию к уменьшению в зависимости от того, на каком уровне проведено обслуживание. Если техническое обслуживание проведено качественно, то интенсивность отказов уменьшается, а если это обслуживание проведено плохо, то увеличивается.

Используя накопленный опыт, можно всегда выбрать тот или иной объем функционирования, который обеспечит нормальную работу системы до очередного технического обслуживания с заданной вероятностью безотказной работы. Или, наоборот, задаваясь последовательностью объемов

функционирования, можно определить приемлемые сроки проведения технического обслуживания, обеспечивающего работу системы на заданном уровне надёжности.

#### **7.3.4. Дополнительные пути повышения надёжности сложных технических систем при эксплуатации**

Для повышения надёжности сложных технических систем в условиях эксплуатации проводят ряд мероприятий, которые можно подразделить на следующие четыре группы:

- 1) разработку научных методов эксплуатации;
- 2) сбор, анализ и обобщение опыта эксплуатации;
- 3) связь проектирования с производством изделий;
- 4) повышение квалификации обслуживающего персонала.

Научные методы эксплуатации включают в себя научно обоснованные методы подготовки изделия к работе, проведения технического обслуживания, ремонта и других мероприятий по повышению надёжности сложных технических систем в процессе их эксплуатации. Порядок и технологию проведения этих мероприятий описывают в соответствующих руководствах и инструкциях по эксплуатации конкретных изделий. Более качественное выполнение эксплуатационных мероприятий по обеспечению надёжности изделий машиностроения обеспечивается результатами статистического исследования надёжности этих изделий. При эксплуатации изделий большую роль играет накопленный опыт. Значительную часть опыта эксплуатации используют для решения частных организационно-технических мероприятий. Однако накопленные данные необходимо использовать не только для решения задач сегодняшнего дня, но и для создания будущих изделий с высокой надёжностью.

Большое значение имеет правильная организация сбора сведений об отказах. Содержание мероприятий по сбору таких сведений определяется типом изделий и особенностями эксплуатации этих изделий. Возможными источниками статистической информации могут быть сведения, полученные

по результатам различных видов испытаний и эксплуатации, которые оформляются периодически в виде отчетов о техническом состоянии и надёжности изделий.

Изучение особенностей их поведения дает возможность использовать накопленные данные для проектирования будущих изделий. Таким образом, сбор и обобщение данных об отказах изделий - одна из важнейших задач, на которую должно быть обращено особое внимание.

Эффективность эксплуатационных мероприятий во многом зависит от квалификации обслуживающего персонала. Однако влияние этого фактора неодинаково. Так, например, при выполнении в процессе обслуживания довольно простых операций влияние высокой квалификации работника сказывается мало, и, наоборот, квалификация обслуживающего персонала играет большую роль при выполнении сложных операций, связанных с принятием субъективных решений (например, при регулировании клапанов и систем зажигания в автомобилях, при ремонте телевизора и т.д.).

### **7.3.5. Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надёжности техники при эксплуатации**

Известно, что в процессе эксплуатации изделие определенное время используют по назначению для выполнения соответствующей работы, некоторое время оно транспортируется и хранится, а часть времени идет на техническое обслуживание и ремонт. При этом для сложных технических систем в нормативно-технической документации устанавливают виды технических обслуживания (ТО-1, ТО-2,...) и ремонтов (текущий, средний или капитальный).

На стадии эксплуатации изделий проявляются технико-экономические последствия низкой надёжности, связанные с простоями техники и затратами на устранение отказов и приобретение запасных частей. С целью поддержания надёжности изделий на заданном уровне в процессе эксплуатации необходимо проводить комплекс мероприятий, который может быть представлен в виде двух групп: мероприятия по соблюдению правил и

режимов эксплуатации; мероприятия по восстановлению работоспособного состояния.

К **первой** группе мероприятий относятся обучение обслуживающего персонала, соблюдение требований эксплуатационной документации, последовательности и точности проводимых работ при техническом обслуживании, диагностический контроль параметров и наличие запасных частей, осуществление авторского надзора и т.п.

К основным мероприятиям **второй** группы относятся корректирование системы технического обслуживания, периодический контроль за состоянием изделия и определение средствами технического диагностирования остаточного ресурса и предотказного состояния, внедрение современной технологии ремонта, анализ причин отказов и организация обратной связи с разработчиками и изготовителями изделий.

Многие изделия значительную часть времени эксплуатации находятся в состоянии хранения, т.е. не связаны с выполнением основных задач. Для изделий, работающих в таком режиме, преобладающая часть отказов связана с коррозией, а также воздействием пыли, грязи, температуры и влаги. Для изделий, находящихся значительную часть времени в эксплуатации, преобладающая часть отказов связана с износом, усталостью или механическим повреждением деталей и узлов. В состоянии простоя интенсивность отказов элементов существенно меньше, чем в рабочем состоянии. Так, например, для электромеханического оборудования это соотношение соответствует 1:10, для механических элементов это соотношение составляет 1:30, для электронных элементов 1:80.

Необходимо отметить, что с усложнением техники и расширением областей её использования возрастает роль этапа эксплуатации техники в суммарных затратах на создание и использование технических систем. Затраты на поддержание в работоспособном состоянии за счет технических обслуживании и ремонтов превышают стоимость новых изделий в



следующее число раз: тракторов и самолетов в 5-8 раз; металлорежущих станков в 8-15 раз; радиоэлектронной аппаратуры в 7-100 раз.

Техническая политика предприятий должна быть направлена на снижение объемов и сроков проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту техники за счет повышения надёжности и долговечности основных узлов.

Консервация машины в состоянии поставки помогает сохранить её работоспособность, как правило, в течение 3-5 лет. Для поддержания надёжности машины в процессе эксплуатации на заданном уровне объем производства запасных частей должен составлять 25-30 % стоимости машин.

## ВЫВОДЫ

В предлагаемом учебном пособии «Часть 1. Основы теории» освещены вопросы, связанные с такими основными понятиями надежности, как виды оперативных состояний и классификация отказов, возможности использования теории случайных величин для описания вероятностных характеристик, основные законы распределения отказов как случайных событий, а также методы повышения надежности резервированием.

Рассмотрены количественные показатели надежности теплоэнергетического оборудования, как единичные, так и комплексные. Приведены основные характеристики ремонтпригодности и долговечности элементов технических систем. Настоящее пособие позволяет студенту усвоить теоретические основы теории надежности как науки, изучающей закономерности распределения отказов технических устройств и конструкций, причины и модели их возникновения.

Планируемая вторая часть электронного учебного пособия «Надежность источников и систем теплоэнергоснабжения промышленных предприятий» ориентирована на рассмотрение вопросов, связанных с оценкой надежности объектов на стадиях проектирования и эксплуатации, а также методов расчета характеристик долговечности и остаточного ресурса технических систем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как известно, даже у одинаковых изделий, работающих в аналогичных условиях, отказы происходят в случайные моменты времени. Количественная оценка надежности связана с природой возникновения отказа, которая является результатом случайного совпадения ряда неблагоприятных факторов. Это свидетельствует о том, что отказ является случайным событием. Надежность является одной из основных характеристик качества, поэтому проблемы качества и эффективности техники невозможно решить без повышения ее надежности. В инженерной практике при проектировании и планировании производства расчеты на надежность проводятся не всегда. Этот факт объясняется сложностью математического аппарата теории надежности, отсутствием достаточно простых и удобных схем, моделей и методик расчета, сложностью и большим объемом вычислений, ограниченностью статистических и экспериментальных данных. Существующие методики оценки риска в промышленности в большинстве случаев недостаточно теоретически обоснованы и, как правило, носят эмпирический или полуэмпирический характер.

Таким образом, в настоящее время очевиден разрыв между теорией надежности и практикой решения инженерных задач. Значительная часть литературы по надежности либо носит узкоспециальный отраслевой характер и содержит сведения или результаты исследований по надежности отдельных видов техники, либо посвящена разработке сложного математического аппарата, ограниченного в практическом использовании.

В связи с этим основная цель настоящего учебного пособия - адаптированный обзор основных положений и методов прикладной теории надежности, которыми могли бы пользоваться специалисты-практики разного профиля. Указанная цель достигается, в том числе, изложением основ теории надежности в максимально обобщенном виде.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Сугак Е.В., Назаров Г.Г., Королев В.Л., Мангараков С.А.** Основы теории надежности. - Красноярск: Сиб. аэрокосмич. акад., 1998. - 380 с.
- Невзоров В.Н., Сугак Е.В.** Надежность машин и оборудования. Основы теории.- Красноярск: Сиб. гос. технологии.ун-т, 1998. - 240 с.
- Невзоров В.Н., Сугак Е.В.** Надежность машин и оборудования. Проектирование, эксплуатация, экспериментальные исследования. - Красноярск: Сиб. гос. технологич. ун-т, 1998. - 264 с.
- Сотсков Б.С.** Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. - М.: Высш.школа, 1970. - 272 с.
- Наумов В.А.** Основы надежности и долговечности в машиностроении.- Омск: Омский политехнический институт, 1972. - 332 с.
- Болотин В.В.** Прогнозирование ресурса машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.
- Проников А.С.** Надежность машин. - М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
- Шульц В.В.** Теория надежности машин. - Л.: Ленинградский инж. строит. ин-т, 1983. - 75 с.
- Хенли Э., Кумамото Х.** Надежность технических систем и оценка риска. - М.: Машиностроение, 1984. - 528 с.
- Кубарев А.И.** Надежность в машиностроении. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 224 с.
- Буравлев А.И., Доценко Б.И., Казаков И.Е.** Управление техническим состоянием динамических систем. - М.: Машиностроение, 1995. - 240 с.
- ГОСТ 15467-79.** Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.
- Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н. и др.** Обеспечение надежности сложных технических систем: учебник. – СПб.: Изд - во «Лань», 2017. – 352 с.

Учебное издание

**Валерий Викторович Пеленко, Александр Александрович Верхоланцев,  
Алексей Михайлович Хлыновский**

**НАДЕЖНОСТЬ ИСТОЧНИКОВ И СИСТЕМ  
ТЕПЛОЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Часть 1. Основы теории

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.П.Новикова  
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2020 г., поз. 121

---

Подп. к публикации 03.12.2020. Изд. № 121. 6,5 печ.л.  
Электронное издание

---

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД,  
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4