

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**О. И. Морозов**

**Технологические методы  
повышения надежности средств  
технологического оснащения  
в машиностроении**

**Учебное пособие**

Ульяновск  
УлГТУ  
2023

УДК 621.7(075.8)

ББК 34.62я73

М 80

*Рецензенты:*

Зам. генерального директора АО «Ульяновский НИАТ», канд. техн. наук М. В. Илюшкин.

Инж.-технолог АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», канд. техн. наук А. В. Кокорин.

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

**Морозов, О. И.**

М 80 Технологические методы повышения надежности средств технологического оснащения в машиностроении : учебное пособие / О. И. Морозов. – Ульяновск: УлГТУ, 2023. – 171 с.

ISBN 978-5-9795-2319-4

Пособие содержит ряд разделов, необходимых для ознакомления студентов с основными положениями теории надежности, основ математического аппарата теории вероятности и применения аналитических методов для повышения надежности и расчета эксплуатационных характеристик технологического оборудования и инструментальной оснастки обработки металлов давлением. В пособии рассмотрены вопросы повышения стойкости, надежности и ремонта кузнечно-штамповочного оборудования и штамповой оснастки.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение» (профиль «Машины и технология обработки металлов давлением»).

**УДК 621.7(075.8)**

**ББК 34.62я73**

ISBN 978-5-9795-2319-4

© Морозов О.И., 2023.  
© Оформление. УлГТУ, 2023.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>6</b>
<b>РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ.....</b>	<b>8</b>
1.1. Теория надежности как наука.....	8
1.2. История развития теории надежности .....	9
1.3. Основные понятия и определения.....	10
1.4. Составляющие и показатели надежности .....	16
1.5. Жизненный цикл объекта.....	19
1.6. Поддержание надежности объекта в процессе эксплуатации.....	21
1.7. Основные показатели надежности .....	23
1.8. Основы теории вероятностей и теории множеств.....	27
1.9. Определение показателей для оценки безотказности.....	35
1.10. Определение показателей для оценки долговечности .....	38
1.11. Определение показателей для оценки сохраняемости.....	39
1.12. Комплексные показатели надежности .....	40
1.13. Нормирование показателей надежности .....	42
<b>РАЗДЕЛ 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ.....</b>	<b>46</b>
2.1. Обработка случайных величин.....	46
2.2. Некоторые законы распределения случайной величины.....	50
<b>РАЗДЕЛ 3. НАДЕЖНОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>56</b>
3.1. Сложные системы и их особенности .....	56
3.2. Структура сложных систем.....	57
3.3. Особенности расчета надежности сложных систем.....	59
3.4. Резервирование систем.....	60
<b>РАЗДЕЛ 4. ИЗНОС И РАЗРУШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ..</b>	<b>63</b>
4.1. Трение и его виды .....	63
4.2. Износ и его виды .....	64
4.3. Характеристики процессов изнашивания.....	66
4.4. Коррозионное разрушение .....	69
4.5. Методы определения износа и разрушения .....	72
4.6. Техническая диагностика .....	73

<b>РАЗДЕЛ 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ В ПРОЦЕССАХ ОМД...</b>	<b>86</b>
5.1. Методы обеспечения надежности работы механизмов и кузнечно-штамповочных машин .....	86
5.2. Методы повышения надежности и работоспособности штампового инструмента .....	89
5.3. Неисправности штампового инструмента и пути их устранения ....	94
5.4. Износ штампового инструмента и способы его восстановления ...	98
<b>РАЗДЕЛ 6. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.....</b>	<b>111</b>
6.1. Лабораторная работа №1. Исследование надежности конструкционного материала при коррозионном изнашивании .....	111
6.2. Лабораторная работа №2. Исследование надежности конструкционного материала при коррозионном изнашивании в условиях повышенных температур .....	120
6.3. Лабораторная работа №3. Исследование надежности конструкционного материала при абразивной эрозии .....	124
<b>РАЗДЕЛ 7. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ.....</b>	<b>130</b>
<b>ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ.....</b>	<b>160</b>
<b>ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ.....</b>	<b>161</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>162</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>164</b>

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

В книге используется система сокращений, принятая к использованию в технической литературе, ниже приведен список сокращений:

**ТС** – техническая система;

**СДС РОНКТД** – система добровольной сертификации специалистов в области неразрушающего контроля и диагностики;

**ОМД** – обработка металлов давлением;

**ТО** – техническое обслуживание;

**ТУ** – технические условия;

**НТД** – научно-техническая документация;

**КПД** – коэффициент полезного действия;

**КШМ** – кузнечно-штамповочные машины;

**КЗ** – кремний зеленый;

**ХОШ** – холодная объемная штамповка;

**ЛШ** – листовая штамповка.

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность – это комплексный фактор, объективно присущий всем техническим системам и дающий возможность устанавливать оптимальную меру соответствия рабочих процессов и выходных характеристик системы ее функциональному назначению.

Усиливающаяся сложность технических устройств, возрастающая ответственность функций, выполняемых ТС, повышение требований к качеству изделий и условиям их работы, возросшая роль автоматизации и роботизации систем управления техническими объектами являются основными факторами, определившими развитие науки о надежности – теории надежности.

Теория надежности устанавливает закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности системы и ее элементов, рассматривает влияние внешних и внутренних воздействий на процессы в системах, создает основы расчета надежности и методики предсказания отказов, изыскивает способы повышения надежности (при конструировании и изготовлении систем и их элементов, а также способы сохранения надежности технических объектов при их эксплуатации).

Научно-техническая революция привела к появлению во второй половине XX века **эргатических** систем нового класса, структурной частью которых является человек-оператор. Обеспечение надежности системы «человек-машина» является главной задачей инженерной психологии; при этом определяющее значение имеет надежность оператора. Ключевой эргатический фактор состоит в том, что, управляя современными техническими системами, оператор постоянно взаимодействует не только с управляемыми объектами, а еще и с их информационными моделями.

Представленное учебное пособие составлено с учетом основных квалификационных требований, обязательных знаний и навыков, необходимых для сертификации специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике (СДС РОНКТД) и сертификации инженеров и аудиторов в области надежности и качества на основе мировых (ТК 56 МЭК «Надежность») и российских (ТК 119 «Надежность в технике») стандартов.

Материал лекций посвящен основным расчетным моделям оценки надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых технических объектов, представлены основные математические модели показателей надежности, описана методика расчета надежности сложных систем, механизмы износа и разрушения технических объектов, а также технологические пути повышения надежности и работоспособности в процессах ОМД.

Пособие составлено с использованием многочисленных источников, ГОСТов, стандартов надежности технических систем и учебных изданий ведущих вузов Российской Федерации и стран СНГ. Для более глубокого изучения соответствующих разделов студентам рекомендуется ознакомиться с научно-технической литературой, представленной в библиографическом списке данного пособия.

# **РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ**

## **1.1. Теория надежности как наука**

Различают общую теорию надежности и прикладные теории надежности. Общая теория надежности имеет три составляющие:

1) **Математическая теория надежности.** Определяет математические закономерности, которым подчиняются отказы и методы количественного измерения надежности, а также инженерные расчеты показателей надежности.

2) **Статистическая теория надежности.** Включает в себя обработку статистической информации о надежности, расчет статистических характеристик надежности и закономерностей отказов.

3) **Физическая теория надежности.** Исследует физико-химические процессы, физические причины отказов, влияние старения и прочности материалов на надежность.

Прикладные теории надежности разрабатываются в конкретной области техники применительно к объектам этой области. Например, существует **теория надежности систем управления, теория надежности электронных устройств, теория надежности машин** и др.

Надежность связана с эффективностью (например, с экономической эффективностью) техники. Недостаточная надежность технического средства имеет следствием:

- снижение производительности из-за простоев вследствие поломок;
- снижение качества результатов использования технического средства из-за ухудшения его технических характеристик вследствие неисправностей;



- затраты на ремонты технического средства;
- потерю регулярности получения результата (например, снижение регулярности перевозок для транспортных средств);
- снижение уровня безопасности использования технического средства.

## **1.2. История развития теории надежности**

**I (начальный) этап.** Он начинается с появления первых технических устройств (это конец XIX в. (приблизительно 1880 г.)) и заканчивается с появлением электроники и автоматики, авиации и ракетно-космической техники (середина XX в.). Уже в начале века ученые стали задумываться, как сделать любую машину неломающейся, появилось такое понятие, как «запас» прочности. Но, при увеличении запаса прочности, увеличивается также и масса изделия, что не всегда приемлемо. Специалисты стали искать пути решения этой проблемы. Основой для решения таких проблем стала **теория вероятностей** и **математическая статистика**. На базе указанных теорий уже в 30-е гг. было сформулировано понятие отказа как превышение нагрузки над прочностью. Теория надежности начинает бурно развиваться с появлением авиации и применения в ней электроники и автоматики.

**II этап.** Этап становления теории надежности (1950–1960 гг.). В 1950 г. военно-воздушные силы США организовали первую группу для изучения проблем надежности радиоэлектронного оборудования. Группа установила, что основная причина выхода из строя радиоэлектронной аппаратуры заключалась в низкой надежности ее элементов, изучила влияние различных эксплуатационных факторов на исправную работу элементов, собрала богатый статистический материал, который в итоге и явился основой складывающейся теории надежности.

**III этап.** Этап классической теории надежности (1960–1970 гг.). В 60–70 гг. появляется космическая техника, требующая повышенной надежности. С целью обеспечения надежности этих изделий начинается анализ конструкции изделий, технологии производства и условий эксплуатации. На данном этапе было установлено, что причины поломок машин можно обнаружить и устранить. Начинает развиваться теория диагностики сложных систем, появляются новые стандарты по надежности машин.

**IV этап.** Этап системных методов надежности (с 1970 г. по настоящее время). На этом этапе были разработаны новые требования к надежности, заложившие основу современных систем и программ обеспечения надежности, были разработаны типовые методики проведения мероприятий по обеспечению надежности [1–20].

Эти методики разделяются на два основных направления: первое направление относится к **потенциальной надежности**, которое учитывает конструктивные (выбор материала, запас прочности и т.д.) и технологические (ужесточение допусков, повышение чистоты поверхности и т.д.) методы обеспечения надежности; второе направление – **эксплуатационное**, которое направлено на обеспечение эксплуатационной надежности (стабилизация условий эксплуатации, совершенствование методов ТО и ремонта и т.д.).

### **1.3. Основные понятия и определения**

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

**Качество** – совокупность свойств, определяющих пригодность изделия к использованию по назначению и его потребительские свойства.

**Надежность** – комплексное свойство технического объекта, которое состоит в его способности выполнять заданные функции, сохраняя свои основные характеристики в установленных пределах. Понятие надежности включает в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохранность.

**Предмет надежности** – изучение причин, вызывающих отказы объектов, определение закономерностей, которым они подчиняются, разработка способов количественного измерения надежности, методов расчета и испытаний, разработка путей и средств повышения надежности.

Объектом исследования надежности как науки является то или иное техническое средство: отдельная деталь, узел машины, агрегат, машина в целом, изделие и др.

**Объект** – техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации. Объектами могут являться различные системы и их элементы.

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

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

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

Надежность объекта характеризуется основными состояниями и событиями. В процессе эксплуатации объект может находиться в одном из следующих состояний (рис. 1.1):

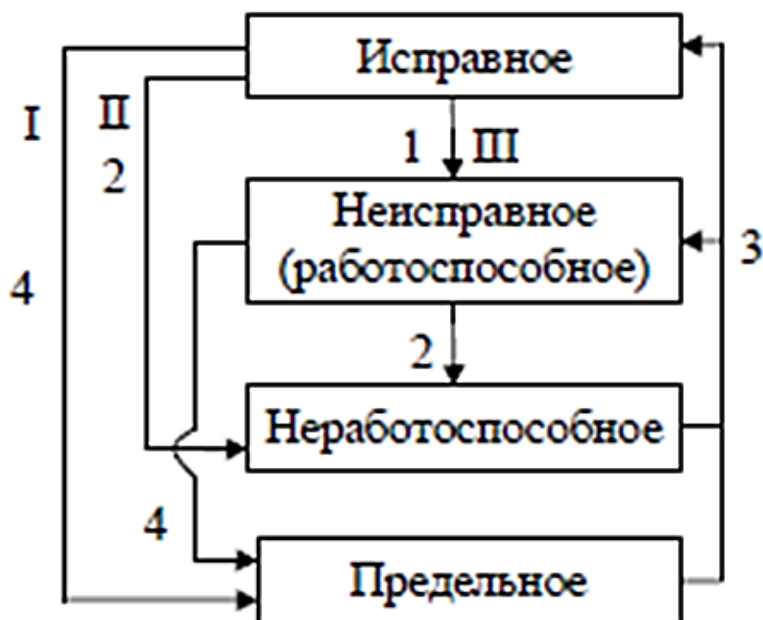


Рис. 1.1. Схема основных технических состояний:

1 – повреждение, 2 – отказ, 3 – ремонт, 4 – переход в предельное состояние из-за наличия критического дефекта, I – критический дефект, II – значительный дефект, III – малозначительный дефект

**Исправное состояние** – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Неисправное состояние** – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Работоспособное состояние** – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Неработоспособное состояние** – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Различают неисправности, не приводящие к отказам (нарушение лакокрасочного покрытия, износ протектора колеса), и неисправности, ведущие к возникновению отказа (поломка кривошипного вала, трещина металлоконструкции, изгиб лопасти вентилятора системы охлаждения). Частным случаем неработоспособного состояния является предельное состояние.

**Предельное состояние** – состояние, при котором дальнейшая эксплуатация объекта недопустима или нецелесообразна, либо восстановление работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации объекта, то есть объект **должен быть выведен из эксплуатации, направлен в ремонт или списан**. Критерии предельного состояния устанавливают в нормативно-технической документации [21–30].

**Повреждение** – это событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении им работоспособного состояния.

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

Понятие исправность шире, чем понятие работоспособность. Работоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по

назначению. Таким образом, если объект неработоспособен, то это свидетельствует о его неисправности; с другой стороны, если объект неисправен, то это не означает, что он неработоспособен.

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

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

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

В связи с этим, объекты могут быть:

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

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

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

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

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

По типу отказы подразделяются на:

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

По своей природе отказы могут быть:

- **случайные**, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п.;
- **систематические**, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п.

Основные признаки классификации отказов:

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

**Внезапные** отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробой изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

**Постепенные** отказы – связаны с износом деталей и старением материалов.

**Конструкционные** отказы – вызваны объективными недостатками и неудачной конструкцией объекта.

**Производственные** отказы – связаны с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства технического процесса или нарушения технологии.

**Эксплуатационные** отказы – вызваны нарушением правил эксплуатации объекта.

**Легкие** отказы – легкоустраняемые; **средние** отказы – не вызывающие отказы смежных узлов – вторичные отказы; **тяжелые** отказы – вызывающие вторичные отказы или приводящие к угрозе жизни и здоровью человека.

**Полные** отказы – исключающие возможность работы объекта до их устранения.

**Частичные** отказы – при которых объект может частично использоваться.

#### **1.4. Составляющие и показатели надежности**

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

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



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

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

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

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

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

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

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

Рассмотрим показатели составляющей надежности – долговечности.

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

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

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

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации (в том числе, хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния. На рис. 1.2 приведена графическая интерпретация перечисленных показателей, при этом  $t_0 = 0$  – начало эксплуатации;  $t_1, t_5$  – моменты отключения по технологическим причинам;  $t_2, t_4, t_6, t_8$  – моменты включения объекта;  $t_3, t_7$  – моменты вывода объекта в ремонт, соответственно, средний и капитальный;  $t_9$  – момент прекращения эксплуатации;  $t_{10}$  – момент отказа объекта.

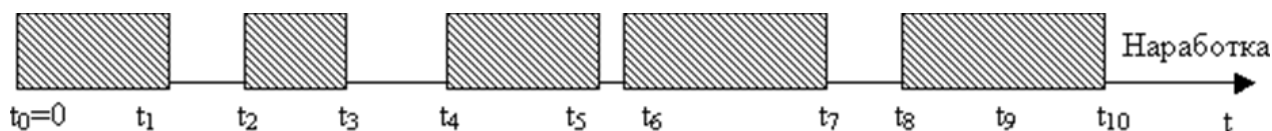


Рис. 1.2. Технический ресурс объекта

Технический ресурс (наработка до отказа) вычисляется по формуле:

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

Назначенный ресурс вычисляется по формуле:

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

Срок службы объекта  $ТС=t_{10}$ .

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

### 1.5. Жизненный цикл объекта

Объект характеризуется жизненным циклом. Жизненный цикл объекта состоит из ряда стадий: проектирование объекта, изготовление объекта, эксплуатация объекта, ремонт и утилизация. Каждая из этих стадий жизненного цикла влияет на надежность изделия.

На стадии **проектирования** объекта закладываются основы его надежности. На надежность объекта влияют: выбор материалов (прочность материалов, износостойкость материалов); запасы прочности деталей и конструкции в целом; удобство сборки и разборки (определяет трудоемкость последующих ремонтов); механическая и тепловая напряженность конструктивных элементов; резервирование важнейших или наименее надежных элементов и другие меры.

На стадии **изготовления** надежность определяется выбором технологии производства, соблюдением технологических допусков, качеством обработки сопрягаемых поверхностей, качеством используемых материалов, тщательностью сборки и регулировки.

На стадии проектирования и изготовления определяются конструктивно-технологические факторы, влияющие на надежность объекта. Действие этих факторов выявляется на стадии эксплуатации объекта. Кроме того, на данной стадии жизненного цикла объекта на его надежность влияют и эксплуатационные факторы.

**Эксплуатация** оказывает решающее влияние на надежность объектов, особенно сложных. Надежность объекта при эксплуатации обеспечивается путем:

- соблюдения условий и режимов эксплуатации (смазка, нагрузочные режимы, температурные режимы и др.);
- проведения периодических технических обслуживаний с целью выявления и устранения возникающих неполадок и поддержания объекта в работоспособном состоянии;
- систематической диагностики состояния объекта, выявления и предупреждения отказов, снижения вредных последствий отказов;
- проведения профилактических восстановительных ремонтов.

Основными причинами снижения надежности в процессе эксплуатации являются износ и старение компонентов объекта. Износ приводит к изменению размеров, нарушению работоспособности (из-за ухудшения условий смазки, например), поломкам, снижению прочности и т.д. Старение приводит к изменению физико-механических свойств материалов, влекущему поломки или отказы.

Условия эксплуатации назначаются такими, чтобы максимально снизить износ и старение: например, износ возрастает в условиях дефицита или низкого качества смазки. Старение возрастает при выходе температурных режимов за допустимые (например, уплотнительные прокладки, клапаны и т.д.).

В период приработки  $t_n$  надежность, в первую очередь, определяется конструктивно-технологическими факторами, что ведет к повышенной интенсивности отказов. По мере выявления и устранения этих факторов надежность объекта приводится к номинальному уровню, который сохраняется в продолжительном периоде  $t_n$  нормальной эксплуатации [1–7, 26–45].

## **1.6. Поддержание надежности объекта в процессе эксплуатации**

Поддержание требуемого уровня надежности технических объектов в процессе эксплуатации осуществляется путем проведения комплекса организационно-технических мероприятий. Сюда входят периодические технические обслуживания, профилактические и восстановительные ремонты.

Периодические технические обслуживания направлены на своевременные регулировки, устранение причин отказов, раннее выявление отказов. Периодические технические обслуживания проводятся в установленные сроки и в установленном объеме. Задачей любого ТО является проверка контролируемых параметров, регулировка в случае необходимости, выявление и устранение неисправностей, замена элементов, предусмотренная эксплуатационной документацией.

Порядок выполнения несложных работ определяется инструкциями по техническому обслуживанию, а порядок выполнения сложных работ – технологическими картами.

В процессе технических обслуживаний обычно осуществляется и диагностика состояния эксплуатируемого объекта (в том или ином объеме).

Диагностика заключается в контроле состояния объекта с целью выявления и предупреждения отказов. Осуществляется диагностика с помощью диагностических средств контроля, которые могут быть встроенными и внешними. Встроенные средства позволяют осуществлять непрерывный контроль. С помощью внешних средств осуществляется периодический контроль.

В результате диагностики выявляются отклонения параметров объекта и причины этих отклонений. Определяется конкретное место

неисправности. Решается задача прогнозирования состояния объекта и принимается решение о его дальнейшей эксплуатации.

Объект считается работоспособным, если его состояние позволяет ему выполнять возложенные на него функции. Если в процессе эксплуатации характеристики объекта или его структура недопустимо изменились, то говорят, что в объекте возникла неисправность. Возникновение неисправности нельзя отождествлять с потерей объектом работоспособности. Однако в неработоспособном объекте всегда будет иметь место неисправность.

Для восстановления показателей надежности объекта при их снижении проводятся профилактические и восстановительные ремонты. Восстановительные ремонты служат для восстановления работоспособности объекта после отказа и поддержания заданного уровня его надежности путем замены деталей и узлов, потерявших свой уровень надежности или отказавших.

Количество ремонтов определяется экономической целесообразностью. Типичная зависимость вероятности безотказной работы ремонтируемого объекта от времени эксплуатации показана на рис. 1.3.

Очередной ремонт не позволяет достичь исходного уровня надежности объекта, и срок эксплуатации объекта после этого ремонта будет меньше, чем после предыдущего ремонта ( $t_3 < t_2 < t_1$ ). Таким образом, эффективность каждого последующего ремонта снижается, что влечет необходимость ограничения общего количества ремонтов объекта.

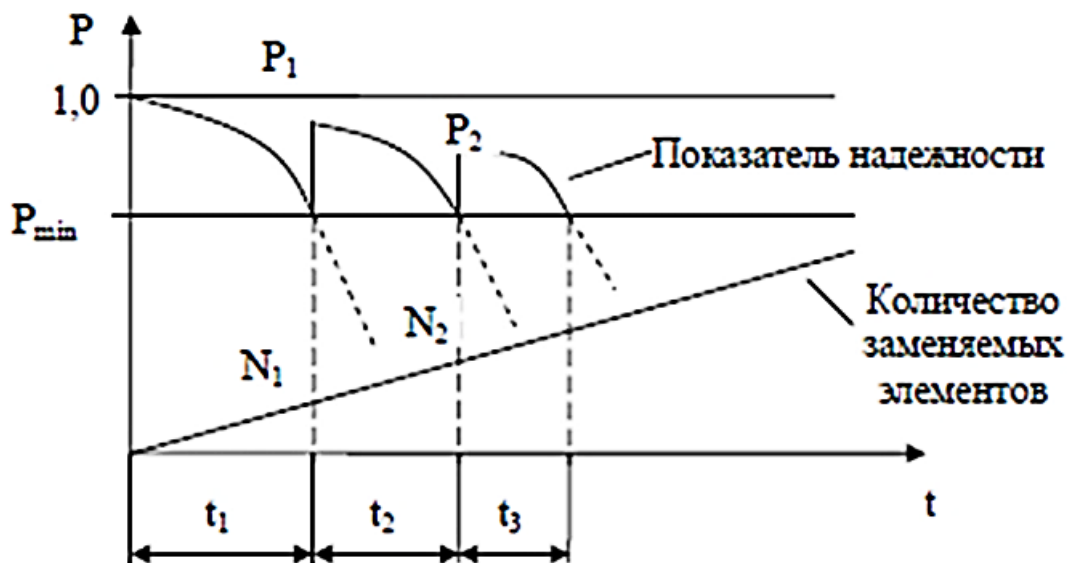


Рис. 1.3. Зависимость вероятности безотказной работы ремонтируемого объекта от времени эксплуатации:

$P$  – вероятность безотказной работы объекта,  $P_{\min}$  – минимально допустимый уровень надежности,  $N$  – число заменяемых при ремонте элементов объекта

## 1.7. Основные показатели надежности

В соответствии с ГОСТ 27.002 надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции [14, 28–55].

Этот стандарт оговаривает как единичные показатели надежности, каждый из которых характеризует отдельную сторону надежности (безотказность, долговечность, сохраняемость или ремонтпригодность), так и комплексные показатели надежности, которые характеризуют одновременно несколько свойств надежности.

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

- **вероятность безотказной работы;**
- **плотность распределения отказов;**

- **интенсивность отказов;**
- **средняя наработка до отказа.**

Показатели надежности представляются в двух формах (определениях):

- **статистическая (выборочные оценки);**
- **вероятностная.**

Статистические определения (выборочные оценки) показателей получаются по результатам испытаний на надежность. Допустим, что в ходе испытаний какого-то числа однотипных объектов получено конечное число интересующего нас параметра – наработки до отказа. Полученные числа представляют собой выборку некоего объема из общей «генеральной совокупности», имеющей неограниченный объем данных о наработке до отказа объекта.

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

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

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

Поскольку в дальнейшем определение выборочных оценок базируется на математических моделях теории вероятностей и



математической статистики, то ниже приводятся основные сведения из теории вероятностей.

Особенность теории вероятностей состоит в том, что она рассматривает явления, где в той или иной форме присутствует неопределенность. Поэтому существует представление, что вероятностные методы решения практических задач считаются менее предпочтительными, чем «точный» анализ, так как обращаться к этим методам вынуждает якобы отсутствие достаточно полной информации. Теория вероятности базируется на ограниченном наборе исходных представлений (всего три аксиомы).

Непреложные законы отражают «поведение» природы, так сказать, «в среднем». Во многих ситуациях такое «среднее поведение» достаточно близко к тому, что наблюдается на практике, и имеющимися отклонениями можно пренебречь. В других, не менее важных ситуациях, случайные отклонения могут оказаться значительными, что требует использования аналитических методов, построенных на вероятностных концепциях.

Поэтому становится ясным, что так называемое «точное решение» вовсе не всегда является точным и, более того, представляет собой идеализированный частный случай, который на практике почти не встречается. С другой стороны, вероятностный подход – далеко не худшая замена точным методам решения и наиболее полно отражает физическую реальность. Кроме того, он включает в себя результат детерминистического подхода в качестве частного случая.

Теперь имеет смысл описать в общем типы ситуаций, в которых применение вероятностных методов расчета при решении практических задач скорее является правилом, чем исключением.

**Случайные параметры систем.** В ряде случаев те или иные параметры системы могут быть неизвестны или изменяться случайным образом. Типичными примерами таких систем являются

электроэнергетические сети, нагрузки которых непредсказуемы и варьируются в широких пределах; телефонные системы, число пользователей которых случайным образом меняется во времени; электронные системы, параметры которых носят случайный характер, из-за того, что характеристики полупроводниковых приборов устанавливаются диапазоном возможных значений.

**Надежность систем.** В состав любой технической системы входит большое количество различных элементов, отказ одного или нескольких из них может вызвать выход из строя всей системы. По мере усложнения и повышения стоимости систем на стадии конструирования возникает задача синтеза логических структурных схем надежности и оптимизации безотказности.

**Контроль качества и диагностика.** Повышение потребительских свойств и конкурентоспособности продукции может быть достигнуто выходным контролем и диагностикой в процессе эксплуатации. Для этого требуются правила проверки отдельных случайно выбранных элементов, вероятностные методы распознавания дефектов и прогнозирования работоспособности.

**Теория информации.** Количественная мера информационного содержания различных сообщений: численные и графические данные, технические измерения носят вероятностный характер. Кроме того, пропускная способность каналов связи зависит от случайных шумовых воздействий и точности технического оборудования.

**Статистическая динамика.** Во многих ситуациях сложные электронные и электромеханические системы помимо полезных и, во многом, случайных входных сигналов (управления, наведения, измерения и т. п.) испытывают случайные нежелательные возмущения. Возникает

задача оценки реакции системы как на случайные входные параметры, так и на внешние возмущения.

Из представленного выше становится ясно, что при решении большого числа технических задач приходится встречаться с неопределенностью, а это делает теорию вероятностей необходимым инструментом современного инженера.

### 1.8. Основы теории вероятностей и теории множеств

**Теория вероятностей** – математическая наука, изучающая закономерности в случайных явлениях. Одним из основных понятий является понятие случайного **события** (в дальнейшем просто событие).

**Событием** называется всякий факт (исход), который в результате опыта (испытания, эксперимента) может произойти или не произойти. Каждому из таких событий можно поставить в соответствие определенное число, называемое его вероятностью и являющееся мерой возможного совершения этого события.

Современное построение теории вероятностей основывается на аксиоматическом подходе и опирается на элементарные понятия теории множеств.

**Множество** – это любая совокупность объектов произвольной природы, каждый из которых называется элементом множества. Множества обозначаются по-разному: или одной большой буквой или перечислением его элементов, данным в фигурных скобках, или указанием (в тех же фигурных скобках) правила, по которому элемент относится к множеству. Например, конечное множество  $M$  натуральных чисел от 1 до 100 может быть записано в виде  $M = \{1, 2, \dots, 100\}$ .

Предположим, что производится некоторый опыт (эксперимент, испытание), результат которого заранее неизвестен, случаен. Тогда

множество всех возможных исходов опыта представляет пространство элементарных событий, а каждый его элемент (один отдельный исход опыта) является элементарным событием. Любой набор элементарных событий (любое их сочетание) считается **подмножеством** (частью) множества и является случайным событием, т. е. любое событие  $A_1$  – это подмножество множества  $A$ .

Например, пространство элементарных событий при бросании игральной кости составляет шесть возможных исходов =  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .

С учетом пустого множества, которое вообще не содержит элементов, в пространстве может быть выделено в общей сложности  $2^6 = 64$  подмножества. В общем случае, если множество содержит  $n$  элементов, то в нем можно выделить  $2^n$  подмножеств (событий).

Рассматривая событие (ведь каждое множество есть свое собственное подмножество), можно отметить, что оно является достоверным событием, то есть осуществляется при любом опыте. Пустое множество как событие является невозможным, то есть при любом опыте заведомо не может произойти.

Для предыдущего примера:

- достоверное событие =  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\} = \{\text{выпадение одного из шести очков}\}$ ;
- невозможное событие =  $\{7\} = \{\text{выпадение 7 очков при одном бросании игральной кости}\}$ .

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

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

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

**Полная группа событий** – такая совокупность событий, при которой в результате опыта должно произойти хотя бы одно из событий этой совокупности. Очевидно, что события  $A$  и  $\bar{A}$  составляют полную группу событий.

Одна из причин применения теории множеств в теории вероятностей заключается в том, что для множеств определены важные преобразования, которые имеют простое геометрическое представление и облегчающее понимание смысла этих преобразований. Оно носит название диаграммы Эйлера-Венна, и на ней пространство изображается в виде прямоугольника, а различные множества – в виде плоских фигур, ограниченных замкнутыми линиями. Пример диаграммы, иллюстрирующей включение множеств  $C$ ,  $B$ ,  $A$  во множество  $\Omega$ , приведен на рис. 1.4 [24–28,47–62].

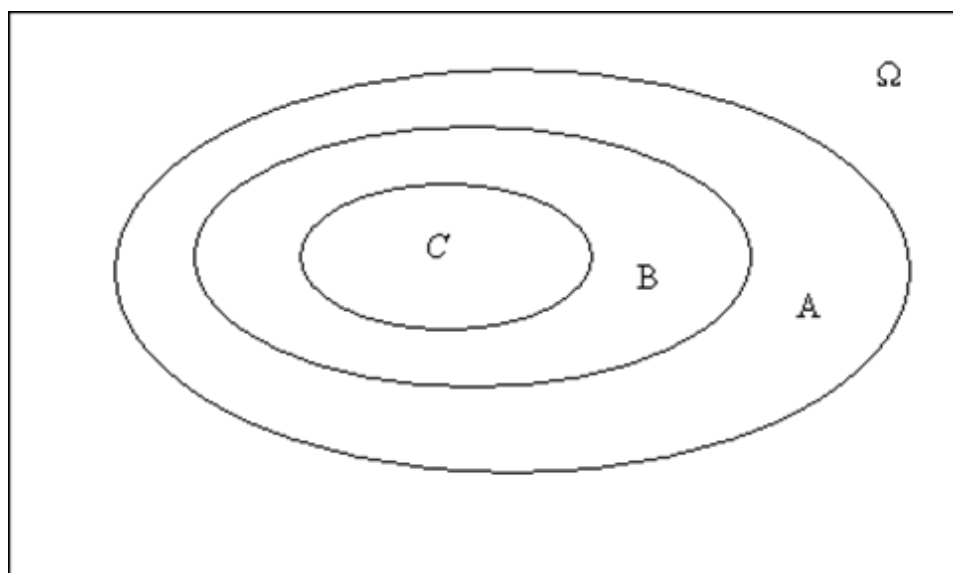


Рис. 1.4. Диаграмма Эйлера-Венна

В прикладных задачах основными являются не прямые, а косвенные методы вычисления вероятностей интересующих нас событий через вероятности других, с ними связанных. Для этого нужно уметь выражать интересующие нас события через другие, т. е. использовать **алгебру событий**.

Отметим, что все вводимые ниже понятия справедливы тогда, когда события о которых идет речь, представляют собой подмножества одного и того же пространства элементарных событий.

Сумма или объединение событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – такое событие  $A$ , появление которого в опыте эквивалентно появлению в том же опыте хотя бы одного из событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . Сумма обозначается

$$A = A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_n = \bigcup_{i=1}^n A_i,$$

где  $\vee$  – знак логического сложения событий,  $\bigcup$  – знак логической суммы событий.

Произведение обозначается как

$$A = A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_n = \bigcap_{i=1}^n A_i,$$

где  $\wedge$  – знак логического умножения событий,  $\bigcap$  – знак логического произведения событий.

Операции сложения и умножения событий обладают рядом свойств, присущих обычным сложению и умножению, а именно: переместительным, сочетательным и распределительным свойствами, которые очевидны и не нуждаются в пояснении.

Диаграммы Эйлера-Венна для суммы (а) и произведения (б) двух событий  $A_1$  и  $A_2$  приведены на рис. 1.5.

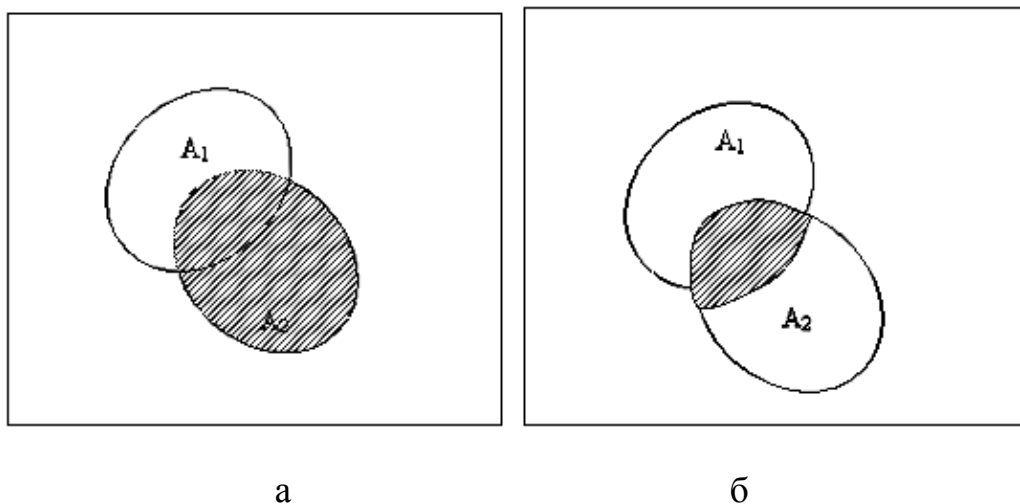


Рис. 1.5. Диаграмма Эйлера-Венна для суммы и произведения двух событий

**Суммой (объединением) событий  $A_1$  и  $A_2$**  является событие, состоящее в появлении хотя бы одного из этих событий (заштрихованная область на рис. 1.5, а). **Произведение событий  $A_1$  и  $A_2$**  – это событие, состоящее в совместном выполнении обоих событий (заштрихованное пересечение событий  $A_1$  и  $A_2$  – рис. 1.5, б).

Изображение противоположного события  $\bar{A}$  приведено на рис. 1.6. Область  $\bar{A}$  дополняет  $A$  до полного пространства. Из определения противоположного события следует, что

$$\bar{\bar{A}} = A.$$

Другие свойства противоположных событий отражены в законах де Моргана, показанных на рисунке 1.7:

$$\overline{A_1 \vee A_2} = \bar{A}_1 \wedge \bar{A}_2,$$

$$\overline{A_1 \wedge A_2} = \bar{A}_1 \vee \bar{A}_2.$$

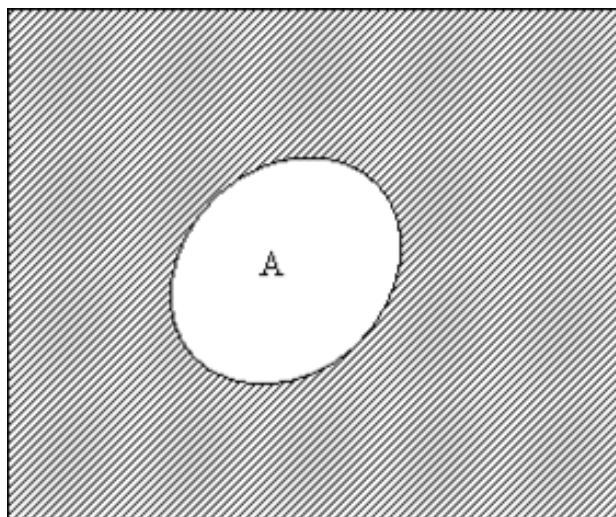


Рис. 1.6. Противоположное событие

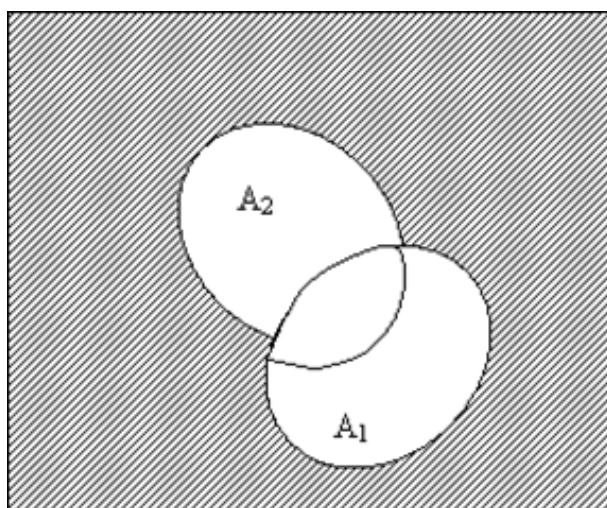


Рис. 1.7. Законы де Моргана

Сопоставим каждому событию  $A$  число, называемое, как и прежде, его вероятностью и обозначаемое  $P(A)$  или  $P\{A\}$ . Вероятность выбирают так, чтобы она удовлетворяла следующим условиям или аксиомам: **вероятность события  $P(A)=1$ ; вероятность противоположного события  $P(\bar{A})=0$ .**

Если события  $A_i$  и  $A_j$  несовместные, то их вероятность равна сумме вероятностей этих двух событий.

Частотное определение вероятности любого события  $A$  определяется, как отношение числа случаев ( $m_A$ ), благоприятных появлению события  $A$ , к общему числу случаев (возможному числу исходов опыта)  $n$ :



$$P(A) = \frac{m_A}{n}.$$

Совершенно очевидно, что частотная оценка вероятности есть не что иное как следствие аксиомы сложения вероятностей. Представив, что число  $n$  неограниченно возрастает, можно наблюдать явление, называемое **статистическим упорядочением**, когда частота события  $A$  все меньше изменяется и приближается к какому-то постоянному значению, которое и представляет вероятность события  $A$ .

Вероятности сложных событий можно вычислять с помощью вероятностей более простых, пользуясь основными правилами (теоремами): сложения и умножения вероятностей.

**Теорема сложения вероятностей:** если  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – несовместные события и  $A$  – сумма этих событий, то вероятность события  $A$  равна сумме вероятностей событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$

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

Эта теорема непосредственно следует из аксиомы сложения вероятностей, в частности, поскольку два противоположных события  $A$  и  $\bar{A}$  несовместны и образуют полную группу, то сумма их вероятностей равна 1

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

**Теорема умножения вероятностей:** чтобы сформулировать в общем случае теорему умножения вероятностей, введем понятие условной вероятности – условная вероятность события  $A_1$  при наступлении события  $A_2$  – вероятность события  $A_1$ , вычисленная в предположении, что событие  $A_2$  произошло; вероятность произведения (совместного появления) двух событий  $A_1$  и  $A_2$  равна вероятности одного из них, умноженной на условную вероятность другого, в предположении, что первое событие произошло.

Следствием правил сложения и умножения вероятностей является **теорема о повторении опытов** (схема Бернулли): опыты считаются

независимыми, если вероятность того или иного исхода каждого из них не зависит от того, какие исходы имели другие опыты.

Пусть в некотором опыте вероятность события  $A$  равна  $P(A) = p$ , а вероятность того, что оно не произойдет  $P(\bar{A})=p+q=1$ . Если проводится  $n$  независимых опытов, в каждом из которых событие  $A$  появляется с вероятностью  $p$ , то вероятность того, что в данной серии опытов событие  $A$  появляется ровно  $m$  раз, определяется по выражению:

$$P_n(m) = \{\text{событие } A \text{ произошло } m \text{ раз}\} = C_n^m p^m q^{n-m},$$

где  $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$  – биномиальный коэффициент.

Часто возникают задачи определения вероятностей того, что некоторое событие  $A$  произойдет по меньшей мере  $m$  раз или не более  $m$  раз. Подобные вероятности определяются сложением вероятностей всех исходов, которые составляют рассматриваемое событие.

Расчетные выражения для такого типа ситуаций имеют вид:

$$P\{\text{событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах менее } m \text{ раз}\} = \sum_{i=0}^{m-1} P_n(i)$$

$$P\{\text{событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах более } m \text{ раз}\} = \sum_{i=m-1}^n P_n(i)$$

$$P\{\text{событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах не более } m \text{ раз}\} = \sum_{i=0}^m P_n(i)$$

$$P\{\text{событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах не менее } m \text{ раз}\} = \sum_{i=m}^n P_n(i)$$

При больших  $m$  вычисление биномиальных коэффициентов  $C_n^m$  и возведение в большие степени  $p$  и  $q$  связано со значительными трудностями, поэтому целесообразно применять упрощенные способы расчетов, например, **теорему Муавра-Лапласа** [4,13,48, 55–70].

## 1.9. Определение показателей для оценки безотказности

Примем следующую схему испытаний для оценки надежности: пусть на испытания поставлено  $N$  одинаковых серийных объектов, условия испытаний идентичны, а испытания каждого из объектов проводятся до его отказа.

Введем следующие обозначения:

$T = \{0, t_1, \dots, t_N\} = \{t\}$  – случайная величина наработки объекта до отказа;  $N(t)$  – число объектов, работоспособных к моменту наработки  $t$ ;  $n(t)$  – число объектов, отказавших к моменту наработки  $t$ ;  $n(t, t+\Delta t)$  – число объектов, отказавших в интервале наработки  $[t, t+\Delta t]$ ;  $t$  – длительность интервала наработки.

**Безотказность** – свойство объекта непрерывно охранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Под **наработкой** понимается продолжительность работы машины, выраженная:

- для машин в целом – во времени (часах);
- для автомобильного транспорта – в километрах пробега автомобиля;
- для авиации – в часах налета самолета;
- для с.-х. техники – в гектарах условной пахоты;
- для двигателей – в моточасах и т.д.

Для оценки безотказности применяют следующие показатели:

**Вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает. Вероятность безотказной работы изменяется от 0 до 1:

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N},$$

где  $N$  – число объектов, работоспособных в начальный момент времени,

$n(t)$  – число объектов, отказавших на момент  $t$  от начала испытаний или эксплуатации.

Вероятность безотказной работы  $P$  объекта связана с **вероятностью отказа  $F$**  следующим соотношением:

$$P(t) = 1 - F(t).$$

Вероятность безотказной работы уменьшается с увеличением времени работы или наработки объекта. Зависимости вероятности безотказной работы  $P(t)$  и вероятности отказа  $F(t)$  от наработки  $t$  представлены на рис. 1.8.

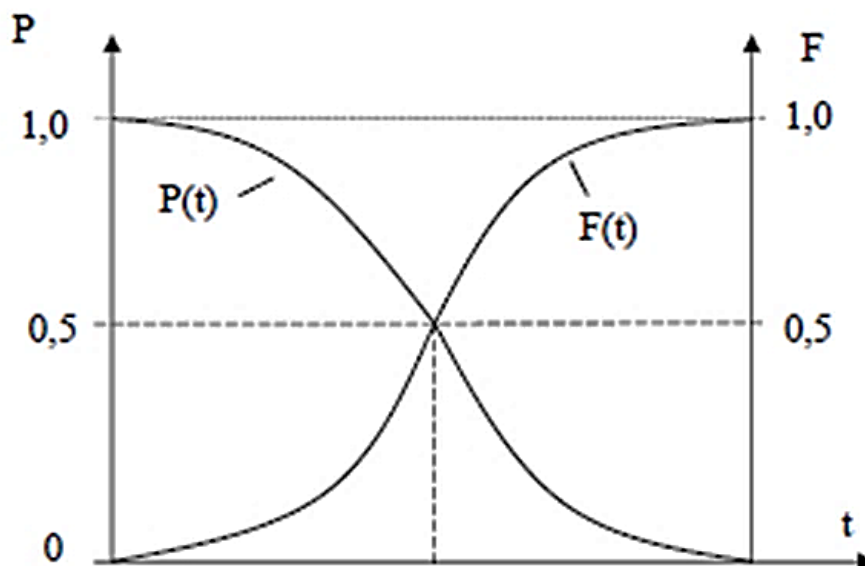


Рис. 1.8. Зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от наработки:

$P$  – вероятность безотказной работы;  $F$  – вероятность отказа

В начальный момент времени для работоспособного объекта вероятность его безотказной работы равна единице (100 %). По мере работы объекта эта вероятность снижается и стремится к нулю. Вероятность возникновения отказа объекта, наоборот, возрастает с увеличением срока эксплуатации или наработки.

**Средняя наработка до отказа** – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Этот показатель часто называют средним временем безотказной работы.

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{\sum_{i=1}^n t_{oi}}{N}.$$

**Плотность вероятности отказа (частота отказов)** – отношение числа отказавших изделий в единицу времени к первоначальному числу находящихся под наблюдением при условии, что отказавшие изделия не восстанавливаются и не заменяются новыми.

$$f(t) = \frac{n(\Delta t)}{N \Delta t},$$

где  $n(\Delta t)$  – число отказов в рассматриваемом интервале наработки;  $N$  – общее число изделий, находящихся под наблюдением,  $\Delta t$  – величина рассматриваемого интервала наработки.

**Интенсивность отказов** – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Иначе говоря, это отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу работающих безотказно за данный промежуток времени при условии, что отказавшие изделия не восстанавливаются и не заменяются новыми.

Интенсивность отказов оценивают по следующей формуле:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t},$$

где  $f(t)$  – частота отказов,  $P(t)$  – вероятность безотказной работы,  $n(\Delta t)$  – число отказавших изделий за время от  $t$  до  $(t+\Delta t)$ ,  $N_{cp}$  – среднее число безотказно работающих изделий:

$$N_{cp} = \frac{N(t) + N(t+\Delta t)}{2},$$

где  $N(t)$  – число безотказно работающих изделий в начале рассматриваемого интервала наработки;  $N(t+\Delta t)$  – число безотказно работающих изделий в конце интервала наработки [23,44–71].

### 1.10. Определение показателей для оценки долговечности

**Долговечность** – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Долговечность машин закладывается при их проектировании и конструировании, обеспечивается в процессе производства и поддерживается в процессе эксплуатации.

**Ресурс** – наработка машины от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до предельного состояния.

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации машины от начала ее эксплуатации или возобновления после ремонта, до наступления предельного состояния.

Для оценки долговечности применяют следующие показатели:

**Средний ресурс** – математическое ожидание ресурса:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{N},$$

где  $t_{pi}$  – ресурс  $i$ -го объекта,  $N$  – число объектов.

**Гамма-процентный ресурс** – наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью, выраженной в процентах.

Для расчета показателя используется формула вероятности:

$$P(T_p) = \frac{\gamma}{100}.$$

**Средний срок службы** – математическое ожидание срока службы:

$$T_{сл} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{сли}}{N},$$

где  $t_{сли}$  – срок службы  $i$ -го объекта,  $N$  – число объектов.

**Гамма-процентный срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

### 1.11. Определение показателей для оценки сохраняемости

**Сохраняемость** – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Для оценки сохраняемости применяют следующие показатели:

**Средний срок сохраняемости** – математическое ожидание срока сохраняемости объекта.

**Гамма-процентный срок сохраняемости** – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение и после которой показатели безотказности, долговечности и ремонтпригодности объекта не выйдут за установленные пределы с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Показатели сохраняемости по сути своей соответствуют показателям долговечности и определяются по тем же формулам.

**Ремонтпригодность** – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

**Время восстановления** – это продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта. Время восстановления равно сумме времен, затрачиваемых на отыскание и устранение отказа, а также на проведение необходимых отладок и проверок, чтобы убедиться в восстановлении работоспособности объекта.

Для оценки ремонтпригодности применяют показатели, перечисленные ниже.

**Среднее время восстановления** – математическое ожидание времени восстановления объекта:

$$T_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{в}i}}{N},$$

где  $t_{\text{в}i}$  – срок восстановления  $i$ -го объекта,  $N$  – число отказов за заданный срок испытаний или эксплуатации.

**Вероятность восстановления работоспособного состояния** – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение. Для большинства объектов машиностроения вероятность восстановления подчиняется экспоненциальному закону распределения:

$$P_{\text{в}}(t) = e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов (принимается постоянной) [25, 43, 65].

## 1.12. Комплексные показатели надежности

Каждый из описанных выше показателей позволяет оценить лишь одну из сторон надежности – одно из свойств надежности объекта. Для более полной оценки надежности используют комплексные показатели, позволяющие одновременно оценить несколько важнейших свойств объекта.

Для того чтобы определить надежность любой машины, необходимо иметь информацию об отказах ее деталей, узлов, агрегатов и самой машины в целом.

Сбором информации об отказах машин занимаются:

- организации-разработчики машины;
- предприятия-изготовители машины;
- эксплуатационные и ремонтные предприятия.



Организации-разработчики (проектные институты) осуществляют сбор и обработку информации о надежности опытных образцов машин путем проведения специальных испытаний.

Предприятия-изготовители (машиностроительные заводы) осуществляют сбор и обработку первичной информации о надежности серийно изготавливаемой продукции и анализ причин отказов машин. Сбор информации они ведут на основе проведения специальных заводских и эксплуатационных испытаний.

Эксплуатационные и ремонтные организации собирают первичную информацию о надежности машин в эксплуатации.

Основным источником получения информации о надежности, особенно транспортных машин, являются испытания разного типа (рис. 1.9).

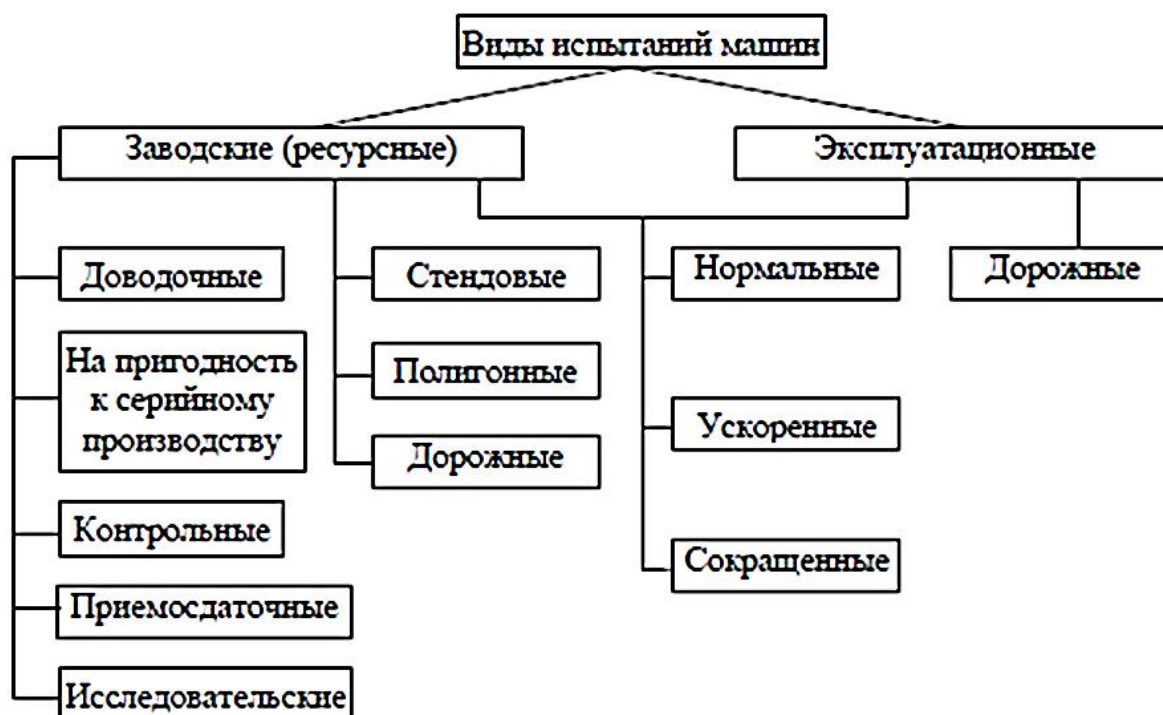


Рис. 1.9. Классификация видов испытаний машин

Сбор информации о надежности машин проводят в соответствии с требованиями отраслевой нормативно-технической документации.

Информация о надежности машин должна удовлетворять следующим требованиям: полнота информации, под которой понимается наличие всех сведений, необходимых для проведения оценки и анализа надежности; достоверность информации, т.е. все сообщения об отказах должны быть точными; своевременность информации позволяет быстрее устранять причины отказов и принимать меры по устранению выявленных недостатков; непрерывность информации позволяет сопоставлять результаты расчетов, полученные в первый и последующий периоды эксплуатации и избавляет от ошибок.

### **1.13. Нормирование показателей надежности**

С целью создания высоконадежных объектов необходимо **нормирование надежности** – установление номенклатуры и количественных значений основных показателей надежности элементов объекта.

Номенклатуру показателей надежности выбирают в зависимости от класса изделий, режимов эксплуатации, характера отказов и их последствий. Выбор показателей надежности может определяться заказчиком.

Все изделия подразделяются на следующие классы:

- **неремонтируемые и невосстанавливаемые** изделия общего назначения. Составные части изделий, невосстанавливаемые на месте эксплуатации и не подлежащие ремонту (например, подшипники, шланги, тонеры, крепежные детали, радиодетали и др.), а также

невосстанавливаемые изделия самостоятельного функционального назначения (например, электрические лампы, контрольные приборы и др.);

- **восстанавливаемые изделия**, подвергающиеся плановым техническим обслуживаниям, текущему и среднему ремонту, а также изделия, подвергающиеся капитальному ремонту;
- изделия, предназначенные для выполнения **кратковременных разовых или периодических заданий**.

Режимы эксплуатации изделий могут быть следующими:

- **непрерывными**, когда изделие работает непрерывно в течение определенного времени;
- **циклическими**, когда изделие работает с заданной периодичностью в течение определенного времени;
- **оперативными**, когда неопределенный период простоя изделия сменяется периодом работы заданной продолжительности.

Обычно нормируют вероятность безотказной работы  $P(t)$  с оценкой ресурса  $T_p$ , в течение которого она регламентируется. Значение  $T_p$  должно быть согласовано со структурой и периодичностью ремонтных работ и технического обслуживания, а допустимая вероятность безотказной работы является мерой опасности последствий отказа.

Градация изделий по классам надежности представлена в табл. 1.1. Значения  $P(t)$  заданы для определенного периода эксплуатации  $T_p$  при условии строгой регламентации и выполнения режимов работы и условий эксплуатации.

Таблица 1.1. Классы надежности

Класс надежности	0	1	2	3	4	5
Допустимое значение $P(t)$	$< 0,9$	$\geq 0,9$	$\geq 0,99$	$\geq 0,999$	$\geq 0,9999$	1

В **нулевой класс** входят малоответственные детали и узлы, отказ которых остается практически без последствий. Для них хорошим показателем надежности может быть средний срок службы, наработка на отказ или параметр потока отказов.

**Классы с первого по четвертый** характеризуются повышенными требованиями к безотказной работе (номер класса соответствует числу девяток после запятой). В пятый класс включаются высоконадежные изделия, отказ которых в заданный период недопустим.

### **Контрольные вопросы к разделу**

1. Поясните понятия качество, надежность, предмет, объект надежности, общая теория надежности, прикладная теория надежности.
2. Этапы развития теории надежности.
3. Дайте определения основных состояний и событий в надежности.
4. Приведите классификацию отказов.
5. В чем состоит различие между восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми изделиями?
6. Что представляет собой кривая изменения интенсивности отказов во времени и кривая изменения эксплуатационных затрат от наработки изделия во времени?
7. Дайте определения основных показателей надежности безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.
8. Дайте определения показателей для оценки безотказности – вероятности безотказной работы и вероятности отказа, параметра потока отказов, средней наработки на отказ, средней наработки до отказа, гамма-процентной наработки до отказа, интенсивности отказов. Каковы единицы их измерения?

9. Дайте определения показателей для оценки долговечности – технического ресурса, срока службы, гамма-процентного ресурса и срока службы. Каковы единицы их измерения?

10. Чем отличается технический ресурс от срока службы изделия?

11. Дайте определения показателей для оценки сохраняемости – среднего и гамма-процентного сроков сохраняемости.

12. Дайте определения показателей для оценки ремонтпригодности – времени восстановления и среднего времени восстановления работоспособности, вероятности восстановления работоспособности в заданные сроки, интенсивности восстановления.

13. Дайте определения комплексных показателей надежности – коэффициента технического использования, коэффициента готовности.

14. Перечислите основные виды испытаний технических объектов.

15. Основные требования, предъявляемые к информации о надежности машин.

16. Перечислите основные методы нормирования показателей надежности.

17. Поясните градацию изделий по классам надежности.

18. Что такое категория последствий отказов?

## РАЗДЕЛ 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

### 2.1. Обработка случайных величин

Надежность объектов нарушается возникающими отказами. Отказы рассматривают как случайные события. Для количественной оценки надежности используются методы теории вероятности и математической статистики [27–36].

Показатели надежности могут определяться: аналитическим путем на основе математической модели – математического определения надежности; в результате обработки опытных данных – статистическое определение показателя надежности.

Момент возникновения отказа, частота возникновения отказов – величины случайные. Поэтому базовыми методами для теории надежности являются методы теории вероятности и математической статистики.

**Случайная величина** – величина, которая в результате опыта принимает одно, наперед неизвестное значение, зависящее от случайных причин, случайные величины могут быть дискретными и непрерывными. Как известно из теории вероятности и математической статистики, общими характеристиками случайных величин являются перечисленные ниже параметры.

#### **Среднее арифметическое значение**

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где  $x_i$  – реализация случайной величины в каждом наблюдении,  $n$  – число наблюдений.

**Размах.** Понятие размаха в теории статистики используется в качестве меры рассеивания случайной величины.

$$R = x_{\max} - x_{\min},$$

где  $x_{\max}$  – максимальное значение случайной величины;  $x_{\min}$  – минимальное значение случайной величины.

**Среднее квадратическое отклонение** является также мерой рассеивания случайной величины:

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

**Коэффициент вариации** также характеризует рассеивание случайной величины с учетом средней величины. Коэффициент вариации определяется по формуле:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}}.$$

Различают случайные величины с малой вариацией ( $V \leq 0,1$ ), средней вариацией ( $0,1 < V \leq 0,33$ ) и большой вариацией ( $V > 0,33$ ). Если коэффициент вариации  $V < 0,33$ , то случайная величина подчиняется **нормальному закону распределения**. Если коэффициент вариации  $0,33 < V < 1$ , то – **распределению Вейбулла**. Если коэффициент вариации  $V = 1$ , то – **равновероятному распределению**.

В теории и практике надежности чаще всего используются следующие законы распределения: **нормальный, логарифмически нормальный, Вейбулла, экспоненциальный**.

Законом распределения случайной величины называется соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Для характеристики закона распределения случайной величины используются следующие функции.

**Функция распределения случайной величины** – функция  $F(x)$ , определяющая вероятность того, что случайная величина  $X$  в результате испытаний примет значение меньше или равное  $x$ :

$$F(x)=P(X\leq x).$$

Функция распределения случайной величины может быть представлена графиком (рис. 2.1).

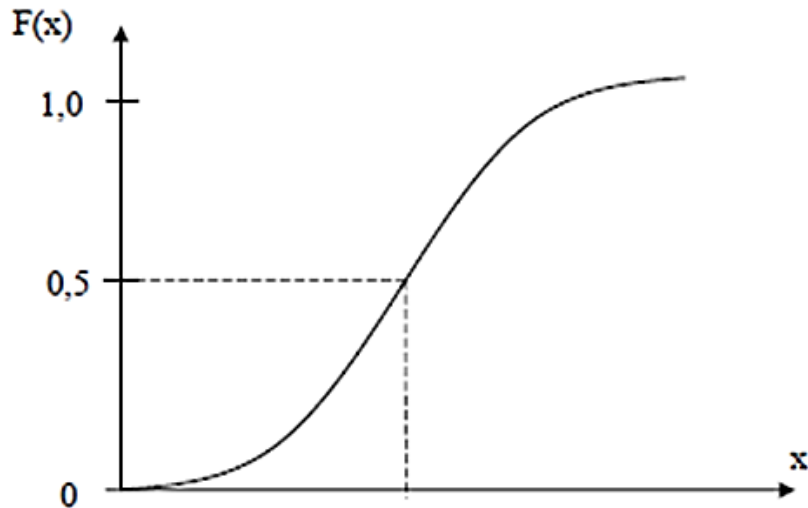


Рис. 2.1. Функция распределения случайной величины

### **Плотность распределения вероятностей** случайной величины

$$f(x)=F'(x).$$

Плотность вероятности характеризует вероятность того, что случайная величина примет конкретное значение  $x$  (рис. 2.2).

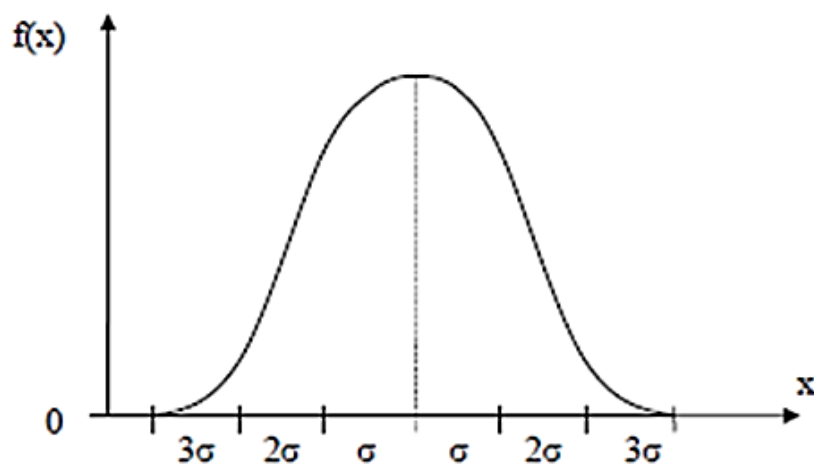


Рис. 2.2. Плотность распределения вероятностей  
(нормальный закон распределения)



Экспериментальной оценкой плотности вероятности случайной величины является гистограмма распределения случайной величины (рис. 2.3).

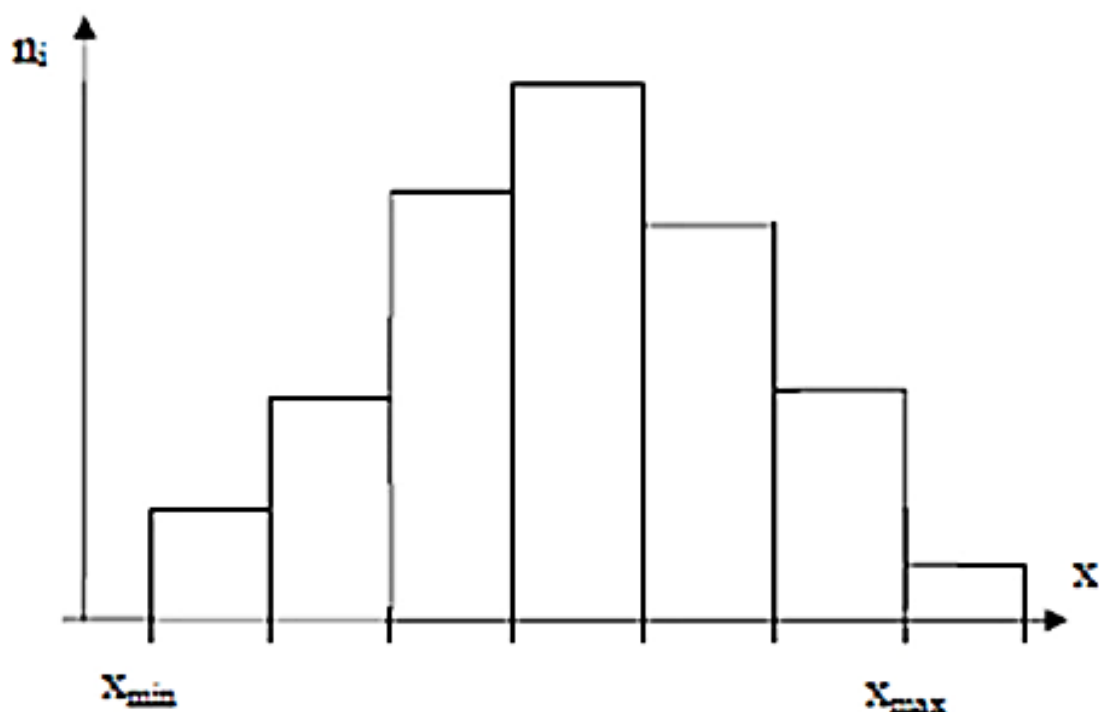


Рис. 2.3. Гистограмма распределения случайной величины

Гистограмма показывает зависимость количества наблюдаемых значений случайной величины в определенном интервале значений от границ этих интервалов. По гистограмме можно приближенно судить о плотности распределения случайной величины.

При построении гистограммы в выборке случайной величины  $x$  из  $n$  значений определяют наибольшее  $x_{\max}$  и наименьшее  $x_{\min}$  значения. Диапазон изменения величины  $R$  разбивают на  $m$  одинаковых интервалов. Затем подсчитывают число наблюдаемых значений случайной величины  $n_i$ , попадающих в каждый  $i$ -й интервал.

## 2.2. Некоторые законы распределения случайной величины

**Нормальное распределение.** Закон нормального распределения является основным в математической статистике. Он формируется тогда, когда на протяжении исследуемого процесса на его результат влияет сравнительно большое число независимых факторов, каждый из которых, в отдельности, оказывает лишь незначительное действие по сравнению с суммарными влияниями всех остальных.

Плотность распределения (частота отказов) при нормальном законе определяется по формуле:

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

Функция распределения (вероятность отказа) данного закона находится по формуле:

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

Функция надежности (вероятность безотказной работы) противоположна функции распределения:

$$P(x) = 1 - F(x).$$

Интенсивность отказов вычисляется по формуле:

$$\lambda(x) = \frac{\bar{x}}{F(x)}.$$

Графики основных характеристик надежности при нормальном законе приведены на рис. 2.4.

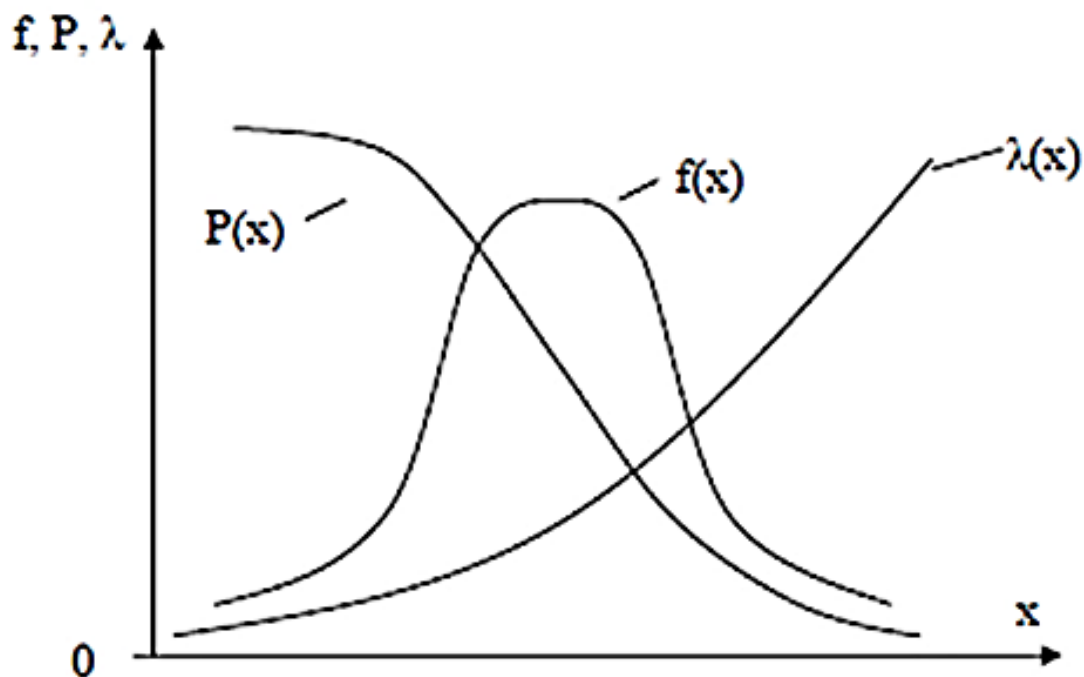


Рис. 2.4. Характеристики надежности машин при нормальном законе распределения

Более 40 % различных случайных явлений, связанных с эксплуатацией автомобилей, описываются нормальным законом: зазоры в подшипниках, обусловленные износом; зазоры в зацеплении главной передачи; зазоры между тормозным барабаном и колодками; периодичность первых отказов рессор и двигателя; периодичность ТО-1 и ТО-2, а также время выполнения различных операций [1–5, 34, 43–57, 71–82].

**Экспоненциальное распределение.** Закон экспоненциального распределения нашел широкое применение, особенно в технике. Основной отличительной чертой этого закона является то, что вероятность безотказной работы не зависит от того, сколько проработало изделие с начала эксплуатации. Закон не учитывает постепенного изменения параметров технического состояния, а рассматривает так называемые «нестареющие» элементы и их отказы. Как правило, данный закон

описывает надежность работы изделия в период его нормальной эксплуатации, когда постепенные отказы еще не проявляются и надежность характеризуется только внезапными отказами. Эти отказы вызываются неблагоприятным сочетанием различных факторов и поэтому имеют постоянную интенсивность  $\lambda$ . Экспоненциальное распределение часто называют основным законом надежности.

Плотность распределения (частота отказов) при экспоненциальном законе определяется по формуле:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}.$$

Вероятность безотказной работы при экспоненциальном законе выражается по следующей формуле:

$$P(x) = e^{-\lambda x},$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов. Интенсивность отказов для экспоненциального распределения является постоянной величиной.

Наработка на отказ находится по формуле:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}.$$

При экспоненциальном законе среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации вычисляются следующим образом:

$$\sigma = T_0 = \frac{1}{\lambda},$$

$$V = \frac{\sigma}{T_0} = 1.$$

График основных характеристик надежности при экспоненциальном законе приведен на рис. 2.5.

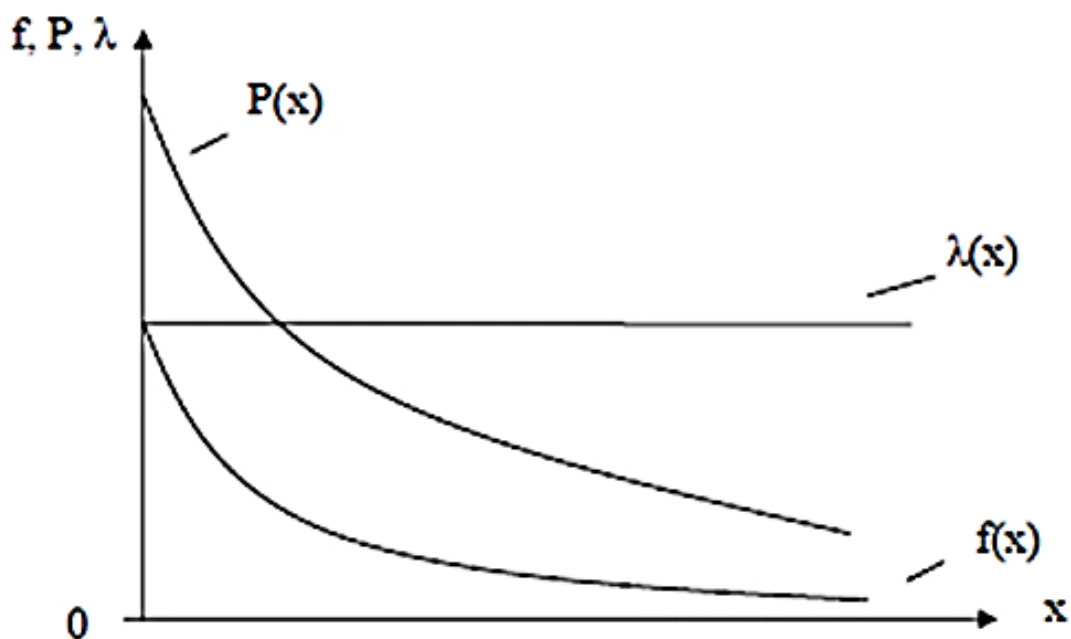


Рис. 2.5. Характеристика надежности машин при экспоненциальном законе

Экспоненциальный закон достаточно хорошо описывает отказ следующих параметров: наработку до отказа многих невосстанавливаемых элементов радиоэлектронной аппаратуры; наработку между соседними отказами при простейшем потоке отказов (после окончания периода приработки); время восстановления после отказов и т.д.

**Распределение Вейбулла.** Распределение Вейбулла является универсальным, так как при изменении параметров оно может описывать практически любые процессы: нормального распределения, логарифмически нормального, экспоненциального.

Плотность распределения (частота отказов) при распределении Вейбулла определяется по формуле:

$$f(x) = \lambda \alpha x^{\alpha-1} e^{-\lambda x^{\alpha}},$$

где  $\lambda$  – параметр масштаба,  $\alpha$  – параметр формы.

Вероятность безотказной работы при законе распределения Вейбулла выражается:

$$P(x) = e^{-\lambda x^\alpha}.$$

Интенсивность отказов определяется по формуле

$$\lambda(x) = \lambda \alpha x^{\alpha-1}.$$

На рис. 2.6 изображены графики надежности при распределении Вейбулла.

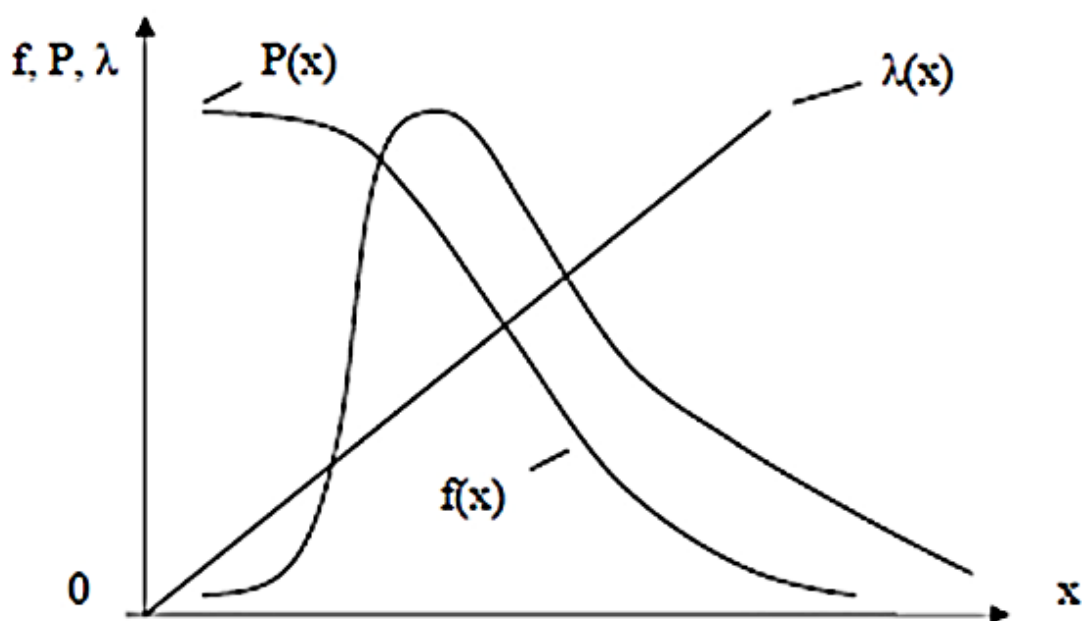


Рис. 2.6. Характеристика надежности машин при законе распределения Вейбулла

Закон распределения Вейбулла описывает отказы многих узлов и деталей автомобилей: подшипников качения; шарниров рулевого привода, карданной передачи; разрушение полуосей и т.д.

### Контрольные вопросы к разделу

1. Дайте определение характеристикам рассеяния случайных распределений — среднему значению, среднему квадратическому отклонению и коэффициенту вариации.
2. Дайте понятие и поясните назначение законов распределения случайных величин.

3. В каких случаях на практике целесообразно применять нормальное распределение, каков вид кривых плотности и функции распределения?

4. В каких случаях на практике целесообразно применять экспоненциальное распределение, каков вид кривых плотности и функции распределения?

5. В каких случаях на практике целесообразно применять распределение Вейбулла, каков вид кривых плотности и функции распределения?

6. Каковы понятие и методика построения гистограммы и кривой эмпирического распределения?

## РАЗДЕЛ 3. НАДЕЖНОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

### 3.1. Сложные системы и их особенности

Под **сложной системой** понимается объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы, каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

Понятие сложной системы **условно**. Оно может применяться как к отдельным узлам и механизмам (двигатель, система подачи топлива к двигателю), так и к самой машине (станок, трактор, автомобиль, самолет).

Сложная машина состоит из большого количества элементов, каждый из которых имеет свои характеристики надежности, при этом не все элементы одинаково влияют на надежность машины. Многие из них влияют лишь на эффективность ее работы, а не на ее отказ. Степень влияния каждого элемента на надежность машины зависит от многих факторов, таких как: назначение элемента, характер взаимодействия элемента с другими элементами машины, структура машины, вид соединений элементов между собой.

Например, неисправность системы питания автомобиля может вызвать перерасход топлива, т.е. неисправность, а отказ системы зажигания может привести к отказу всего автомобиля.

Каждый экземпляр сложной машины имеет индивидуальные черты, т.к. незначительные вариации свойств отдельных элементов машины сказываются на выходных параметрах самой машины. Чем сложнее машина, тем большими индивидуальными особенностями она обладает.

При анализе надежности сложных машин их разбивают на элементы (звенья) с тем, чтобы вначале рассмотреть параметры и характеристики



элементов, а затем оценить работоспособность всей машины. Теоретически любую сложную машину можно условно разделить на большое число элементов, понимая под элементом узел, агрегат или деталь.

Под **элементом** будем понимать составную часть сложной машины, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами.

При анализе надежности сложного изделия все его элементы и детали целесообразно разделить на следующие группы:

- элементы, работоспособность которых за срок службы практически не изменяется. Для автомобиля это его рама, корпусные детали, малонагруженные элементы с большим запасом прочности;
- элементы, работоспособность которых меняется в течение срока службы машины. Эти элементы, в свою очередь, подразделяются на:
  - **не лимитирующие надежность машины** – срок службы таких элементов сопоставим со сроком службы самой машины;
  - **лимитирующие надежность машины** – срок службы таких элементов меньше срока службы машины;
  - **критические по надежности** – срок службы таких элементов не очень большой, от 1 до 20 % срока службы самой машины.

### 3.2. Структура сложных систем

С позиций теории надежности могут быть следующие структуры сложных машин (рис. 3.1):

- **расчлененные** – у которых надежность отдельных элементов может быть заранее определена, так как отказ элемента можно рассматривать как независимое событие;

- **связанные** – у которых отказ элементов является зависимым событием, связанным с изменением выходных параметров всей машины;
- **комбинированные** – состоящие из подсистем со связанной структурой и с независимым формированием показателей надежности для каждой из подсистем.

Для технологического оборудования обработки давлением, как сложных систем, характерна комбинированная структура, когда надежность отдельных подсистем (агрегатов, узлов) может рассматриваться независимо.

Соединение элементов в сложной машине может быть последовательным, параллельным и смешанным (комбинированным).

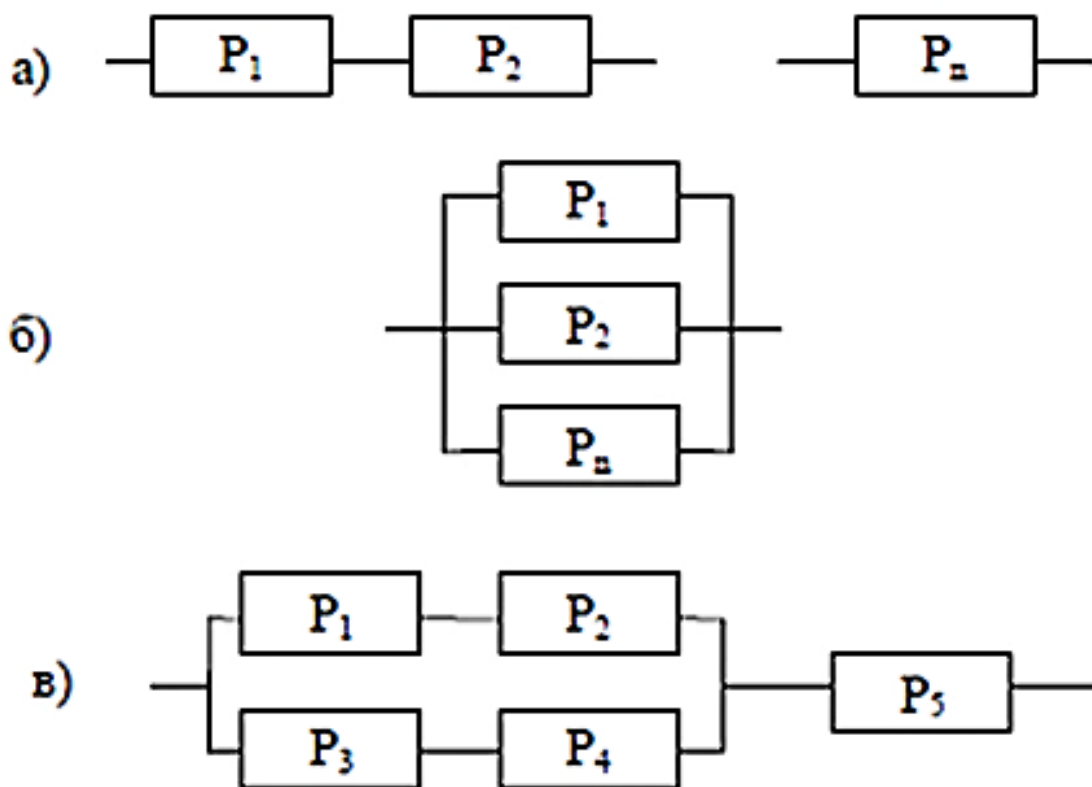


Рис. 3.1. Схемы соединений элементов:

а) последовательное; б) параллельное; в) смешанное

### 3.3. Особенности расчета надежности сложных систем

Наиболее характерен случай, когда отказ одного элемента выводит из строя всю систему, как это имеет место при последовательном соединении элементов.

Например, большинство приводов машин и механизмы передач технологического оборудования подчиняются этому условию. Так, если в приводе машины выйдет из строя любая шестерня, подшипник, муфта и т.д., то весь привод перестанет функционировать. При этом отдельные элементы не обязательно должны быть соединены последовательно. Например, подшипники на валу редуктора работают конструктивно параллельно друг с другом, однако, выход из строя любого из них приводит к отказу системы.

Вероятность безотказной работы системы **с последовательным соединением элементов** вычисляется по формуле:

$$P(t) = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i.$$

Из формулы видно, что даже если сложная машина состоит из элементов высокой надежности, то в целом она обладает низкой надежностью за счет наличия большого числа элементов в ее конструкции, соединенных последовательно.

В конструкции автомобиля имеет место в основном последовательное соединение элементов. В этом случае отказ любого элемента вызывает отказ самого автомобиля.

Пример расчета из области автомобильного транспорта: у агрегата автомобиля, состоящего из четырех последовательно соединенных элементов, вероятность безотказной работы элементов за определенную наработку составляет  $P_1 = 0,98$ ;  $P_2 = 0,65$ ;  $P_3 = 0,88$  и  $P_4 = 0,57$ . В этом

случае вероятность безотказной работы за ту же наработку всего агрегата равна  $P_c = 0,98 \cdot 0,65 \cdot 0,88 \cdot 0,57 = 0,32$ , т.е. очень и очень низкая.

Иными словами, надежность автомобиля с последовательно соединенными элементами ниже надежности самого слабого его звена. Поэтому при усложнении конструкции автомобиля, его агрегатов и систем, одним из проявлений которого является увеличение числа элементов в системе, требования к надежности каждого элемента возрастают.

**При параллельном соединении элементов** вероятность безотказной работы системы вычисляется по формуле:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i).$$

Например, если вероятность безотказной работы каждого элемента  $P=0,9$ , а количество элементов равно трем ( $n = 3$ ), то  $P(t)=0,999$ . Таким образом, вероятность безотказной работы системы резко повышается и становится возможным создание надежных систем из ненадежных элементов.

Параллельное соединение элементов в сложных системах повышает ее надежность.

### **3.4. Резервирование систем**

Для повышения надежности сложных систем часто применяют **структурное резервирование**, то есть введение в структуру объекта дополнительных элементов, выполняющих функции основных элементов в случае их отказа.

Классификация различных способов резервирования осуществляется по следующим признакам:

**По схеме включения резерва:**

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

#### **По способу включения резерва:**

- постоянное резервирование – без перестройки структуры объекта при возникновении отказа его элемента;
- динамическое резервирование, при котором при отказе элемента происходит перестройка структуры схемы (в свою очередь оно подразделяется на резервирование замещением, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного; скользящее резервирование, при котором несколько основных элементов резервируются одним или несколькими резервными, каждый из которых может заменить любой основной, т.е. группы основных и резервных элементов идентичны).

#### **По состоянию резерва:**

- нагруженное (горячее) резервирование, при котором резервные элементы (или один из них) постоянно присоединены к основным и находятся в одинаковом с ними режиме работы; оно применяется тогда, когда не допускается прерывания функционирования системы во время переключения отказавшего элемента на резервный;
- облегченное резервирование, при котором резервные элементы (по крайней мере один из них) находятся в менее нагруженном режиме по сравнению с основными, и вероятность их отказа в этот период мала;
- ненагруженное (холодное) резервирование, при котором резервные элементы до начала выполнения ими функций находятся в

ненагруженном режиме (в этом случае для включения резерва необходимо соответствующее устройство, отказ ненагруженных резервных элементов до включения вместо основного элемента невозможен) [14, 23–43, 55–63].

### **Контрольные вопросы к разделу**

1. Поясните понятие сложной системы и ее особенности с позиций надежности.
2. Перечислите четыре группы элементов сложных систем.
3. Поясните отличия основных типов структур сложных систем – расчлененных, связанных и комбинированных.
4. Поясните расчет схемной надежности сложных систем при последовательном соединении элементов.
5. Поясните расчет схемной надежности сложных систем при параллельном соединении элементов.
6. Поясните термин структурного резервирования.
7. Перечислите виды резервирования в зависимости от схемы включения резерва.
8. Перечислите виды резервирования в зависимости от способа включения резерва.
9. Перечислите виды резервирования в зависимости от состояния резерва.

## РАЗДЕЛ 4. ИЗНОС И РАЗРУШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

### 4.1. Трение и его виды

От 80 до 90 % подвижных сопряжений машин выходят из строя вследствие износа. При этом снижаются КПД, точность, экономичность, надежность и долговечность машин. Процесс взаимодействия поверхностей при их относительном движении изучает такая научно-техническая дисциплина, как **трибология**, объединяющая проблемы трения, износа и смазки.

Существуют четыре вида трения.

**Сухое трение** возникает при отсутствии смазки и загрязнений между трущимися поверхностями. Обычно сухое трение сопровождается скачкообразным перемещением поверхностей.

**Граничное трение** наблюдается в том случае, когда поверхности трущихся тел разделены слоем смазки толщиной от 0,1 мкм до толщины одной молекулы, который называется граничным. Его наличие снижает силы трения от двух до десяти раз по сравнению с сухим трением и уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз.

**Полусухое трение** – это смешанное трение, когда на площади контакта тел трение местами граничное, а на остальной части сухое.

**Жидкостное трение** характеризуется тем, что трущиеся поверхности полностью разделены толстым слоем смазки. Слои смазки, находящиеся от поверхности на расстоянии свыше 0,5 мкм, имеют возможность свободно перемещаться один относительно другого. При жидкостном трении сопротивление движению складывается из сопротивления скольжению слоев смазки относительно друг друга по толщине смазочного слоя и зависит от вязкости смазочной жидкости. Этот режим характеризуется

весьма малым коэффициентом трения и является оптимальным для узла трения в отношении его износостойкости.

Следует отметить, что иногда в одном и том же механизме наблюдаются различные виды трения. Так, например, в двигателе внутреннего сгорания стенки цилиндров в нижней части смазываются обильно, вследствие чего при движении поршня на середине хода трение колец и поршня о стенку цилиндра приближается к жидкостному. При движении поршня вблизи верхней мертвой точки (особенно при такте впуска) условия смазки колец и поршня резко ухудшаются, так как оставшаяся на стенках цилиндра масляная пленка претерпевает изменения под воздействием высокой температуры продуктов сгорания. Особенно плохо смазывается верхняя часть цилиндра. После пуска холодного двигателя возможно граничное и даже сухое трение компрессионных колец о стенки цилиндра, что является одной из причин повышенного износа цилиндров в верхней части.

#### **4.2. Износ и его виды**

**Изнашиванием** называют процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Изнашивание обычно подразделяется на следующие виды:

- **механическое** — возникает в результате режущего или царапающего действия твердых частиц, находящихся между поверхностями трения;



- **абразивное** – изнашивание поверхности детали, которое происходит в результате режущего или царапающего действия твердых тел или частиц;

- **эрозионное** (гидроабразивное, газоабразивное, электроэрозионное) – изнашивание происходит в результате воздействия на поверхность детали движущегося с большой скоростью потока жидкости, газа, твердых частиц, в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока;

- **кавитационное** – изнашивание возникает при относительном движении твердого тела и жидкости в условиях кавитации. Кавитация наблюдается в жидкости при падении давления в ней до давления насыщенных паров, когда нарушается сплошность потока жидкости и образуются кавитационные пузыри. В момент достижения предельного размера они начинают захлопываться с большой скоростью, что приводит к гидравлическому удару о поверхность металла;

- **усталостное** – изнашивание под действием знакопеременных напряжений. Ему подвержены зубчатые передачи, подшипники качения и скольжения;

- **адгезионное** – изнашивание (изнашивание при заедании) происходит при схватывании металлов в процессе трения с образованием прочных металлических связей в зонах непосредственного контакта поверхностей;

- **коррозионно-механическое** – возникает при трении материалов, вступающих в химическое взаимодействие с окружающей средой;

- **окислительное изнашивание** – происходит в том случае, когда кислород, содержащийся в воздухе или в смазке, вступает во взаимодействие с металлом и образует на нем оксидную пленку, которая

при трении истирается или отрывается от металла и удаляется со смазкой, а затем образуется вновь (примером окислительного изнашивания может служить изнашивание верхней части цилиндров двигателя внутреннего сгорания при действии кислотной коррозии, происходящей при низкой температуре стенок, особенно при работе непрогретого двигателя);

- **изнашивание при фреттинг-коррозии** – заключается в образовании на поверхностях взаимного касания деталей язвенок и продуктов коррозии в виде порошка или налета. Изнашивание при этом зависит от одновременно протекающих процессов микросхватывания, усталостного, коррозионно-механического и абразивного воздействия.

#### 4.3. Характеристики процессов изнашивания

Основными количественными характеристиками изнашивания являются износ, скорость изнашивания, интенсивность изнашивания.

**Износ** – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Износ (**абсолютный или относительный**) характеризует изменение геометрических размеров (**линейный износ**), массы (**весовой износ**) или объема (**объемный износ**) детали вследствие изнашивания.

**Скорость изнашивания**  $V_{и}$  (м/ч, г/ч, м<sup>3</sup>/ч) – отношение износа  $U$  к интервалу времени  $t$ , в течение которого он возник:

$$V_{и}=U/t.$$

**Интенсивность изнашивания**  $J$  – отношение износа к обусловленному пути  $L$ , на котором происходило изнашивание, или объему проделанной работы:

$$J=U/L.$$

При линейном износе интенсивность изнашивания является безразмерной величиной, а при весовом – измеряется в единицах массы, отнесенной к единице пути трения.

Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения характеризуется износостойкостью – величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания, в соответствующих единицах.

В процессе работы машины показатели изнашивания деталей и сопряжений не сохраняют постоянных значений. Изменения износа деталей во времени в общем случае можно представить в виде модели, предложенной В.Ф. Лоренцом [1–43, 67–76]. В начальный период работы, называемый периодом приработки, наблюдается довольно быстрый износ деталей (рис. 4.1, участок I). Продолжительность этого периода обуславливается качеством поверхностей и режимом работы механизма и составляет обычно 1,5–2% ресурса узла трения. После приработки наступает период установившегося режима изнашивания (рис 4.1, участок II), определяющий долговечность сопряжений. Третий период – период катастрофического изнашивания (рис. 4.1, участок III) – характеризует предельное состояние механизма и ограничивает ресурс. Как видно из приведенных графиков, процесс изнашивания оказывает прямое, определяющее влияние на возникновение отказов и неисправностей узлов трения машин. Изменение показателей надежности во времени идентично изменению показателей изнашивания. Более высокая крутизна кривой на участке II объясняется тем, что с наработкой возникают отказы, вызванные, помимо износа, усталостным, коррозионным разрушением или пластическими деформациями.

**Приработкой** называют процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в

начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания. Процесс приработки характеризуется интенсивным отделением с поверхностей трения продуктов износа, повышенным тепловыделением и изменением микрогеометрии поверхностей.

$U, V, m, \lambda$

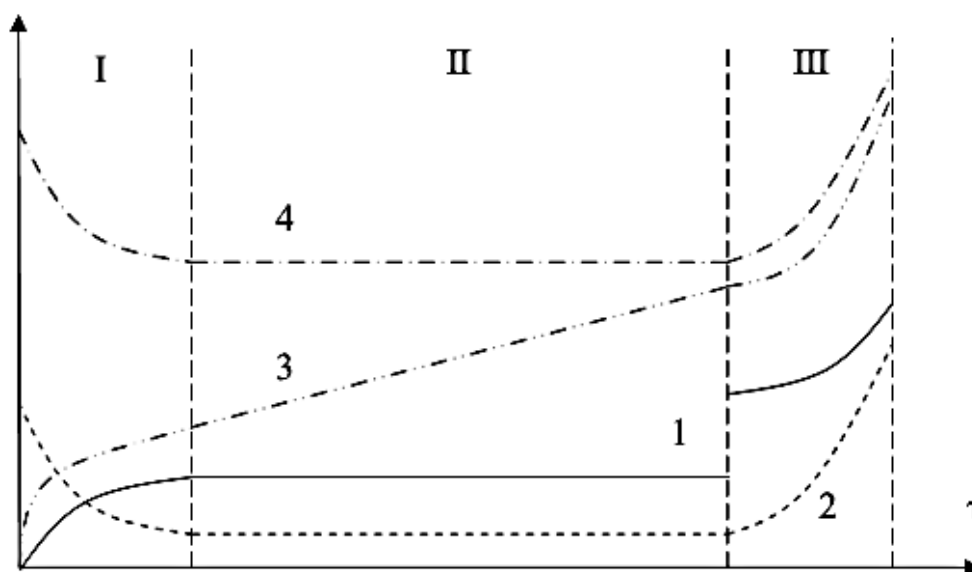


Рис. 4.1. Изменение параметров сопряжения в процессе работы:

1 – износа  $U$ ; 2 – скорости изнашивания  $V$ ; 3 – частоты отказов  $m$ ;

4 – интенсивности отказов  $\lambda$

При правильном выборе соотношения твердости деталей и режимов приработки довольно быстро наступает период так называемого нормального, или установившегося изнашивания (рис. 4.1, участок II). Этот период характеризуется небольшой, примерно постоянной, интенсивностью изнашивания и продолжается до тех пор, пока изменения размеров или формы деталей не повлияют на условия их работы, или до наступления предела усталости материала.

Накопление изменений геометрических размеров и физико-механических свойств деталей ведет к ухудшению условий работы

сопряжения. Основным фактором при этом является повышение динамических нагрузок вследствие увеличения зазоров в трущихся парах.

В результате наступает период катастрофического, или прогрессивного изнашивания (рис. 4.1, участок III). Описанная закономерность является **условной** и служит лишь иллюстрацией процесса изнашивания элементов машин.

#### **4.4. Коррозионное разрушение**

**Коррозией** металлов и сплавов называется их самопроизвольное разрушение в результате химического, электрохимического взаимодействия с внешней средой, вследствие которого они переходят в окисленное состояние и изменяют физико-механические свойства.

Коррозионные процессы в зависимости от механизма взаимодействия металла со средой делятся на два типа – химическую и электрохимическую коррозию, и 36 видов, наиболее встречающимися из которых являются [67–90]:

- **в зависимости от характера коррозионной среды:** атмосферная, газовая, жидкостная, подземная (почвенная), биологическая;
- **в зависимости от условий протекания коррозионного процесса:** структурная, подповерхностная, межкристаллитная, контактная, щелевая, коррозия под напряжением, коррозионная кавитация, фреттинг-коррозия;
- **в зависимости от вида коррозионного разрушения:** сплошная, местная (локальная).

**Химическая коррозия** – процесс разрушения материала в результате непосредственного взаимодействия при высоких температурах с кислородом воздуха, сероводородом, водяными парами.

Основным условием возникновения химической коррозии является отсутствие электропроводящей среды, что нехарактерно, к примеру, для деталей автотранспортных средств. Однако в некоторых элементах кузова эту коррозию можно наблюдать. Так разрушаются (прогорают) выпускные трубы и глушители, разрушаются элементы кузова, непосредственно примыкающие к выпускному трубопроводу двигателя или к впускной трубе (например, юбка кузова автобуса, задний буфер легковых автомобилей).

**Электрохимическая коррозия** возникает в результате воздействия на металл среды (электролита). Она связана с возникновением и протеканием электрического тока с одной поверхности на другую.

Интенсивность процесса электрохимической коррозии зависит от доступа кислорода к поверхности металла, химического состава сплава, плотности продуктов коррозии, которые могут резко замедлять электрохимический процесс структурной неоднородности металла, наличия и распределения внутренних напряжений.

**Газовая коррозия** происходит при высоких температурах в среде агрессивных газов при отсутствии влаги.

**Межкристаллитная коррозия** – невидимая невооруженным глазом, представляет собой разрушение металла между кристаллами при действии знакопеременных нагрузок.

**Контактная коррозия** случается при соединении двух металлов, имеющих различные потенциалы, и при наличии электролита.

**Коррозия под напряжением** возникает, когда деталь подвергается коррозии при динамическом или статическом напряжении.

**Щелевая коррозия** особенно распространена в кузовах ввиду того, что в них имеется большое количество щелей и зазоров. Щелевая коррозия развивается в местах постановки болтов, заклепок, в местах точечной сварки.

**Коррозионная кавитация** характерна для тех деталей кузова, которые подвергаются воздействию воды, например, днище кузова. Капли влаги, попадая на днище, создают замыкание кавитационных пузырьков, гидравлические удары.

**Сплошная коррозия** возникает при эксплуатации машин в загрязненной атмосфере, начинаясь на ответственных наружных поверхностях и во внутренних полостях корпусных и силовых элементов (порогов, поперечин, усилителей и т.п.).

**Местная коррозия** бывает межкристаллитной и в виде язв, точек, нитей. Коррозия в виде язв оставляет на металле отдельные очаги разрушения, в случае тонколистового металла – сквозные. Точечная коррозия возникает на деталях, имеющих пассивирующие пленки, и имеет вид точек, продукты ее выпадают в виде столбиков. Нитевая коррозия по характеру близка к межкристаллитной и возникает под слоем краски или другого защитного покрытия в виде извилистой нити, глубоко поражающей металл.

**Методы защиты от коррозии** условно подразделяются на три группы:

- **методы повышения коррозионной стойкости металлов:** нанесение лакокрасочных, гальванических (хромирование, никелирование, цинкование), химических (оксидирование, фосфатирование) или пластмассовых (газопламенное, вихревое и другие способы напыления) защитных покрытий; использование сплавов, однородных по составу или с легирующими добавками, например, хрома, алюминия, кремния;
- **методы воздействия на среду:** герметизация сопряжений, устранение зазоров, введение в среду эксплуатационных материалов антикоррозионных присадок;
- **комбинированные методы** [11, 14, 39, 44–59, 91–96].

#### **4.5. Методы определения износа и разрушения**

**Метод микрометрирования.** Метод основан на измерении при помощи микрометра или измерительного прибора с индикатором параметров до и после изнашивания.

Недостатки метода: неизбежная разборка и сборка изделия до и после работы с целью измерения детали; выявленное изменение размера может быть следствием не только изнашивания поверхности, но и результатом деформации детали; разборка и сборка изделий в процессе эксплуатации резко снижает эксплуатационные качества машин.

**Метод искусственных баз.** Состоит в том, что на поверхности выдавливают или вырезают углубления заданной формы (пирамида или конус) и глубины. Наблюдая за изменением размера отпечатка, соотношение которого с глубиной заранее известно, можно определить местный линейный износ. Используются специальные приборы, позволяющие определять с точностью от 1,5 до 2 мкм для отверстий цилиндров двигателей, валов, а также плоских поверхностей.

Недостаток метода – также требует в большинстве случаев предварительной разборки изделий и поэтому имеет те же недостатки, что и метод микрометрирования.

**Метод измерения износа по уменьшению массы.** Основан на взвешивании детали до и после изнашивания, обычно применяется при испытании деталей небольшой массы.

Недостаток метода – может оказаться неприемлемым, когда износ происходит вследствие не только отделения частиц, но и пластического деформирования.

**Метод анализа содержания железа в масле.** Основан на химическом анализе золы, получаемой сжиганием пробы масла. За период



между двумя последовательными отборами проб учитывают общее количество масла в картере, его потерю и количество доливаемого масла.

Данный анализ является интегральным, так как продукты износа обычно отделяются одновременно от нескольких трущихся деталей. Точное определение количества железа осложняется тем, что крупные частицы продуктов износа могут оседать на стенках картера.

**Метод радиоактивных изотопов.** Заключается в том, что в материал изучаемой детали вводят радиоактивный изотоп. При этом вместе с продуктами износа в масло будет попадать пропорциональное им количество атомов радиоактивного изотопа. По интенсивности их излучения в пробе масла можно судить о количестве металла, попавшего в масло за рассматриваемый период времени.

Преимущества метода: определяется износ определенной детали, а не суммарный для нескольких деталей; чувствительность повышается в сотни раз; ускоряется процесс исследования.

Недостатки метода: требуется специальная подготовка образцов исследуемых деталей; наличие специальной аппаратуры для измерения интенсивности излучения и принятие мер предосторожности для охраны здоровья людей.

#### **4.6. Техническая диагностика**

**Диагностика** — это отрасль науки, которая изучает различное состояние технического объекта, имеет методики определения состояния технического объекта в настоящий момент времени, оценку состояния в прошлом и будущем.

Техническое состояние машины (узла, агрегата) оценивается параметрами, которые подразделяются на структурные и диагностические.

**Структурный параметр** – физическая величина, непосредственно характеризующая техническое состояние (работоспособность) машины (например, размеры сопряженных деталей и зазоры между ними); ее определяют прямыми замерами.

**Диагностический параметр** – физическая величина, косвенно характеризующая состояние машины (например, количество прорывающихся в картер газов, мощность двигателя, угар масла, стуки и т.д.); ее контролируют при помощи средств диагностики. Диагностические параметры отражают изменение структурных.

Между структурными и соответствующими им диагностическими параметрами существует определенная количественная связь.

Количественной мерой параметров состояния (структурных и диагностических) являются их значения, которые могут быть номинальными, допустимыми, предельными и текущими (рис. 6.1).

**Номинальное значение параметра** соответствует значению, которое установлено расчетом, и гарантируется изготовителем в соответствии с ТУ. Номинальное значение наблюдается у новых и капитально отремонтированных составных частей.

**Допустимое значение (отклонение) параметра** – граничное его значение, при котором составную часть машины после контроля допускают к эксплуатации без операций технического обслуживания или ремонта. Это значение приводят в технической документации на обслуживание и ремонт машин. При допустимом значении параметра составная часть машины надежно работает до следующего планового контроля.

**Предельное значение параметра** – наибольшее или наименьшее значение параметра, которое может иметь работоспособная составная часть. При этом дальнейшая эксплуатация составной части или машины в целом без проведения ремонта недопустима из-за резкого увеличения

интенсивности изнашивания сопряжений, чрезмерного снижения экономичности машины или нарушения требований безопасности.

**Текущее значение параметра** – значение параметра в каждый конкретный момент времени.

**Предельные значения параметров** состояния в зависимости от того, на основании каких критериев (признаков) они устанавливаются, делятся на три группы: технические; технико-экономические; технологические (качественные).

**Технические критерии (признаки)** характеризуют предельное состояние составных частей, когда они не могут больше выполнять свои функции по техническим причинам (например, предельное увеличение шага цепи свыше 40 % номинального значения приводит к ее проскальзыванию на звездочках и спаданию) или, когда дальнейшая эксплуатация объекта приведет к аварийному отказу (например, работа при предельном давлении масла в магистрали приводит к выходу силовой установки из строя).

**Технико-экономические критерии**, характеризующие предельное состояние, указывают на снижение эффективности использования объекта вследствие изменения технического состояния.

**Технологические критерии** характеризуют резкое ухудшение качества выполнения работ по причине предельного состояния рабочих органов машин.

По объему и характеру информации диагностические параметры делятся: на общие (интегральные); поэлементные.

**Общие параметры** – это параметры, характеризующие техническое состояние объекта в целом. Они в большинстве случаев не дают сведений о конкретной неисправности машины.

**Поэлементные параметры** – это параметры, которые указывают на вполне конкретную неисправность узла или механизма машины.

**Основными задачами** технического диагностирования являются:

- установление вида и объема работ по ТО машины после выполнения ею определенной наработки;
- определение остаточного ресурса машины и степени ее готовности к выполнению механизированных работ;
- осуществление контроля качества профилактических операций при проведении ТО;
- выявление причин и характера неисправностей, возникающих в процессе использования машины.

Главной задачей технической диагностики является определение технического состояния объекта (машины) в требуемый момент времени. При решении этой задачи, в зависимости от момента времени, при котором требуется определить техническое состояние машины, различают три взаимосвязанных и дополняющих друг друга направления:

- **техническая диагностика**, т.е. определение технического состояния машины, в котором она находится в настоящий момент;
- **техническая прогностика**, т.е. научное предсказание технического состояния машины, в котором она окажется в некоторый будущий момент;
- **техническая генетика**, т.е. определение технического состояния машины, в котором она находилась в некоторый момент времени в прошлом (в технической литературе часто вместо термина «техническая генетика» используется термин «ретроспекция»).

Внедрение технической диагностики позволяет: сохранить оптимальные рабочие характеристики машины в течение всего срока службы; в 2–2,5 раза снизить простои машин по причине технических неисправностей за счет предупреждения отказов; в 1,3–1,5 раза увеличить межремонтную наработку сборочных единиц и агрегатов машин;

ликвидировать преждевременные разборки агрегатов и узлов и тем самым уменьшить интенсивность изнашивания деталей, сопряжений; полностью использовать межремонтный ресурс машин, их узлов и агрегатов, что обеспечит резкое сокращение расхода запасных частей; определить качество ТО и ремонта машины без ее разборки; уменьшить расход топлива и средств на содержание техники.

Диагностические параметры должны обладать следующими свойствами (удовлетворять основным требованиям):

**Однозначность.** Предусматривает соблюдение условия, когда каждому значению структурного или функционального параметра соответствует одно-единственное значение диагностического параметра.

**Стабильность.** Устанавливает возможную величину отклонения диагностического параметра от своего среднего значения, характеризующую рассеивание параметра при неизменных значениях структурных параметров и условиях их измерения. Чем меньше рассеивание, тем выше стабильность. Происходит это в основном из-за ошибки метода диагностирования. Нестабильность диагностического параметра снижает достоверность оценки объекта диагностики [1–16].

**Информативность.** Оценивается количеством информации о техническом состоянии объекта, которое содержит этот параметр.

**Технологичность.** Возможность измерения выходного параметра с минимальными затратами труда и средств. Технологичность определяется удобством подключения диагностической аппаратуры, простотой измерения и обработки результатов измерения. Характеризуется трудоемкостью и стоимостью диагностирования.

Методы диагностирования подразделяют на две группы: **органолептические (субъективные) и инструментальные (объективные).**

**Органолептические методы** диагностирования представляют из себя проверку качества объекта при помощи органов чувств.

На слух выявляют места и характер ненормальных стуков, шумов, перебоев в работе механизмов, места увеличения зазора отдельными элементами, неисправностей силовых установок и передаточных механизмов (по скрежету, шуму и люфту), неплотности защитных кожухов (по шуму прорывающегося воздуха) и т.д.

Осмотром устанавливают места подтекания масла, воды, топлива, смазок, цвет отработавших газов, биение вращающихся частей, натяжение цепных передач.

Осязанием устанавливают места и степень ненормального нагрева, биения, вибрации деталей, вязкость, липкость жидкости.

Обонянием определяют по характерному запаху отказ муфт сцепления, течь технических жидкостей, электролита, короткое замыкание электропроводки.

**Инструментальные, или объективные, методы** применяют для измерения и контроля всех параметров технического состояния, используя при этом диагностические средства.

По физическому принципу или процессу инструментальные методы диагностирования делятся на **энергетические, пневмогидравлические, тепловые, виброакустические, спектрографические, оптические и др.**

Например, в основе энергетического процесса лежат физические величины — сила, мощность; пневмогидравлического — давление; теплового — температура; виброакустического — амплитуда колебаний на определенных частотах.

По характеру измерения параметров инструментальные методы диагностирования машин подразделяются на **прямые и косвенные**.

**Прямые методы** основаны на измерении структурных параметров технического состояния непосредственно прямым измерением: зазоров в подшипниках, прогиба ременных и цепных передач, размеров деталей.

**Косвенные методы** основаны на определении параметров технического состояния агрегатов машин по диагностическим (косвенным) параметрам. Они основываются на измерении значений непосредственно физических величин, характеризующих техническое состояние механизмов, систем и агрегатов машин: давления, перепада давлений, температуры, перепада температур в рабочем теле системы, расхода газа, топлива, масла, параметров вибрации составных частей машин, ускорения при разгоне двигателя.

В зависимости от способа воздействия на объект диагностики различают функциональное и тестовое диагностирование.

**При функциональном диагностировании** все задачи технического диагностирования решаются при работе машины по назначению. В этом случае машина выполняет заданные функции в обычном режиме и на нее поступают только рабочие воздействия, предусмотренные алгоритмом функционирования самой машины.

**При тестовом диагностировании** на машину подаются специально организуемые тестовые воздействия, которые поступают на машину от исследователя через органы управления машиной либо (и) от контрольно-диагностических средств. Состав и последовательность подачи этих воздействий выбираются из условия эффективности организации процесса диагностирования.

Применительно к автомобилю это могут быть специальные воздействия в виде задания определенной нагрузки, определенной скорости движения или замедления, определенной частоты вращения. Чаще всего эти тестовые воздействия задаются механизму при его

испытаниях на специальном диагностическом оборудовании (мощностных стендах, специальных диагностических приборах).

При диагностировании сложных систем используются как тестовые, так и функциональные режимы.

Принято выделять три основные группы средств технического измерения диагностических параметров, которые классифицируются в зависимости от их вида (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Классификация средств технического диагностирования

В настоящее время широкое развитие получают **встроенные (бортовые)** средства диагностирования машин. Эти средства позволяют диагностировать машину в процессе эксплуатации и подразделяются на следующие группы: предельные автоматы, прекращающие работу автомобиля (агрегата); индикаторы постоянного действия (стрелочные, световые; например, указатель давления масла в системе смазки двигателя) либо периодического действия (сигнализаторы или приборы визуального наблюдения, такие как датчик уровня жидкости); накопители информации



с выводом на сигнализаторы или с периодическим съемом информации для последующей ее обработки в стационарных условиях.

По возможности приема информации средства диагностирования подразделяются на **одноканальные и многоканальные**.

По степени универсальности средства диагностирования подразделяются **на универсальные и специализированные**.

Комбинация встроенных и внешних средств диагностирования позволяет значительно снизить вероятность пропуска отказов и повысить достоверность информации.

Автоматизация процессов диагностирования существенно улучшает основные показатели и характеристики систем диагностирования. В частности, благодаря автоматизации удается значительно сократить время на выдачу диагноза, понизить требования к квалификации операторов-диагностов, а в ряде случаев вообще отказаться от их услуг, снизить трудоемкость операций диагностирования, улучшить форму представления результатов диагноза и повысить достоверность его постановки.

Все приборы для замера диагностических параметров можно условно разделить на приборы трех поколений:

- **приборы первого поколения** производят фиксированное значение одного диагностического параметра (приборы для замера геометрических размеров, температур, манометры, электрические приборы для замера отдельно взятых величин);
- **приборы второго поколения** состоят из датчика, промежуточного преобразователя и фиксирующего устройства;
- **приборы третьего поколения** имеют в своем составе несколько датчиков, которые передают сигнал на усилитель, затем на аналого-цифровой преобразователь и компьютер.

При измерении неэлектрических величин одной из наиболее важных задач является преобразование всех измеряемых параметров в унифицированные электрические сигналы, обеспечивающие наибольшее удобство при последующих измерениях, обработке и представлении информации. Эту функцию осуществляют датчики. К числу измеряемых при диагностировании неэлектрических величин относят: линейные и угловые перемещения, скорости и ускорения, силы и крутящие моменты, давления, расходы жидкостей и газов, температуры, а также временные интервалы.

К числу **промежуточных преобразователей** в первую очередь относят электрические схемы, в которые включают датчики. Все датчики с параметрическими первичными преобразователями включают в специальные измерительные схемы (потенциометрические, мостовые, автогенераторные), которые осуществляют преобразование изменений параметров первичного преобразователя в изменения параметров сигнала на выходе схемы. Первичные генераторные преобразователи некоторых типов (например, тахогенераторы) и преобразователи электрических величин (шунты, трансформаторы тока и напряжения) соединяют непосредственно без промежуточного преобразования с приборами.

К **приборам** относят все средства измерений, предназначенные для получения информации об измеряемой величине, в форме, удобной для восприятия оператором. Приборы по способам снятия данных делят на приборы с визуальным отсчетом и регистрирующие. Первые по типу индикации можно разделить на приборы с отсчетом по шкале (шкальные), с цифровым отсчетом (цифровые) и со знаковым представлением информации (дисплеи). Регистрирующие приборы, в свою очередь, делят на приборы с открытой формой записи информации (самописцы),

осциллографы, цифропечатающие устройства и приборы со скрытой формой записи информации (дисковые накопители).

По функциональному назначению датчики подразделяются на датчики – преобразователи и пороговые датчики.

По способу подключения к объекту диагностики датчики подразделяются на **легкосъемные и встроенные**.

**Датчики-преобразователи** обеспечивают преобразование контролируемого параметра в величину, удобную для ее передачи к измерительным и логическим системам контроля. Такое преобразование необходимо при контроле как электрических, так и неэлектрических выходных параметров.

Обычно контролируемый параметр преобразуется в постоянное напряжение. В процессе преобразования информация о величине контролируемого параметра не должна теряться, поэтому чаще всего применяется линейное преобразование, когда выходное постоянное напряжение датчика пропорционально величине контролируемого параметра. В этом случае датчик-преобразователь называется линейным.

**Пороговым датчиком** является такое устройство, которое самостоятельно оценивает контролируемый параметр по принципу: «в норме» – «не в норме». Если контролируемый параметр находится в пределах установленного допуска, то пороговый датчик выдает сигнал одного потенциала или знака. При выходе контролируемого параметра за пределы поля допуска выдается сигнал другого потенциала или знака.

В простейших системах сигнал от датчика передается на регистрирующие или индикаторные устройства. Регистрирующие устройства – это стрелочные или цифровые указатели, а индикаторные устройства – это подсвечивающие табло или звуковые сигналы. Датчик-

преобразователь в сочетании с указателем представляет собой простейшее средство измерения любого параметра, в том числе и диагностического.

Пороговые датчики, как правило, работают в сочетании с индикаторным устройством. Эту систему можно отнести к простейшим средствам диагностики, поскольку сам пороговый датчик осуществляет допусковой контроль соответствующего параметра.

**Легкосъемные датчики** подсоединяются к объекту диагностики только на период проведения диагностических операций, а встроенные – встроены в конструкцию объекта и являются его неотъемлемой частью. Встроенные датчики подразделяются: на постоянно работающие, т.е. постоянно дающие информацию об изменении контролируемого параметра; работающие только в период проведения диагностирования объекта [6, 23, 45, 56, 78].

### **Контрольные вопросы к разделу**

1. Что такое изнашивание?
2. Назовите различия и приведите примеры сухого, граничного, полусухого и жидкостного трения.
3. Приведите общую классификацию изнашивания.
4. Приведите классификацию механического изнашивания.
5. Приведите классификацию коррозионно-механического изнашивания.
6. Дайте определения характеристикам изнашивания – износу (линейному, объемному, массовому), скорости и интенсивности изнашивания, износостойкости и относительной износостойкости.
7. Поясните методики следующих экспериментальных методов определения износа: микрометрирования, метода искусственных баз,

метода измерения износа по уменьшению массы, метода анализа содержания железа в масле, метода радиоактивных изотопов.

8. Каковы достоинства и недостатки перечисленных методов?

9. Назовите основные методы снижения интенсивности изнашивания.

10. Поясните понятие коррозии и обоснуйте важность ее предотвращения?

11. Перечислите виды коррозии в зависимости от характера коррозионной среды, условий протекания коррозионного разрушения, вида коррозионного разрушения.

12. Каковы механизмы химической и электрохимической коррозии?

13. Перечислите и поясните на конкретных примерах основные методы борьбы с коррозией.

14. Дайте понятие технической диагностики.

15. Какие способы и виды технической диагностики вам известны?

## **РАЗДЕЛ 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ В ПРОЦЕССАХ ОМД**

### **5.1. Методы обеспечения надежности работы механизмов и кузнечно-штамповочных машин**

Особенностью кузнечно-штамповочных машин с точки зрения оценки их надежности является сравнительно малая серийность их выпуска, большой вес, габаритные размеры, стоимость, в связи с чем невозможно постановка на испытание большого количества машин. Таким образом, надежность в рассматриваемом случае понимается не в узком смысле как безотказность, а в широком смысле – как совокупность свойств, обусловленных безотказностью, долговечностью и ремонтпригодностью.

Необходимой предпосылкой для количественного определения показателей надежности и долговечности является установление законов распределения времени (сроков) появления отказов в работе машин и определение сроков службы деталей.

Условия работы кузнечно-прессовых машин вызывают износ как крупных, сложных в изготовлении дорогостоящих деталей, так и мелких деталей. Для оценки надежности и долговечности кузнечно-штамповочных машин далеко не равнозначно, появился ли отказ в работе, например, из-за поломки пружины, трудоемкость изготовления которой незначительна, или же из-за поломки кривошипного вала, изготовление и замена которого вызывают большие затраты труда и средств.

Для оценки долговечности принимается один показатель – **гарантированный технический ресурс до первого капитального ремонта.**

Понятие капитального ремонта определяется следующими факторами:

- одновременной заменой нескольких крупных дорогостоящих ответственных деталей;
- ремонтом или заменой базовых деталей;
- в связи с ремонтом или заменой базовых деталей заменой многих других, сопрягаемых с ними деталей;
- восстановлением размерных цепей сложных механизмов;
- восстановлением параметров машины;
- полной разборкой и сборкой всех узлов машины.

Для оценки надежности рекомендуется применять коэффициент технического использования:

$$K = \frac{T_p}{T_p + T_{пр}},$$

где  $T_p$  – время работы (ресурс времени) изделия в единицах времени;  $T_{пр}$  – простой изделия, связанный с его техническим обслуживанием и ремонтом, в единицах времени.

Принимая, что при  $t=0$  изделие находится в исправном состоянии, представим основное уравнение теории надежности для кузнечно-штамповочного оборудования в следующем виде:

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

Данная формула и ее производные позволяют определить точные значения показателей безотказной работы. При испытаниях или наблюдениях в эксплуатации определяются их статистические (приближенные) значения, позволяющие произвести качественную оценку точных значений. При этом для описания надежности машин необходимо иметь статистические модели (законы распределения времени безотказной работы).

Наиболее часто здесь встречаются два основных определения, используемых при оценке надежности КШМ.

Экспоненциальный закон надежности справедлив для описания надежности машин при постоянной интенсивности отказов  $\lambda(t)=\lambda$ , что соответствует основному периоду их эксплуатации. Экспоненциальный закон надежности позволяет определить число изделий, которые находятся в эксплуатации в момент времени  $t$  (при  $t = 0$  в эксплуатацию поступили  $N_0$  изделий).

Нормальное распределение является наиболее часто используемой моделью, его применяют в теории надежности для описания отказов, вызванных износом деталей.

Поскольку надежность является мерой способности машины выполнять определенные функции в заданном промежутке времени, то, естественно, ее можно измерять временным параметром, т.е. в отработанных часах. Простейшей формулой для подсчета времени в отработанных часах является следующая зависимость:

$$t_i = \frac{mD\Phi_{\Pi}}{100},$$

где  $m$  – число месяцев работы;  $\Phi_{\Pi}$  – действительный месячный фонд рабочего времени в часах с учетом сменности работы;  $D$  – действительное рабочее время машины в % от полного времени смены, т.е. коэффициент загрузки в %.

Время безотказной работы кузнечно-штамповочных машин, узлов и деталей является случайной величиной, и в общем случае распределяется по **усеченному нормальному закону**.

Плотность распределения вероятности усеченного нормального распределения определяется уравнением следующего вида:

$$f(t) = \frac{G}{\sigma_0\sqrt{2\pi}},$$



где  $G = \frac{1}{F_0\left(\frac{t_0}{\sigma_0}\right)}$ ;  $t$  – время появления отказа в работе или срок службы;  $\tau_0$  – генеральная средняя распределения;  $\sigma_0$  – генеральное распределение.

Функция распределения:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt.$$

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = \frac{F_0\left(\frac{t_0-t}{\sigma_0}\right)}{F_0\left(\frac{t_0}{\sigma_0}\right)}.$$

## 5.2. Методы повышения надежности и работоспособности штампового инструмента

Основными видами **термической обработки**, применяемыми при изготовлении деталей оснастки, являются **отжиг, нормализация, закалка и отпуск**.

**Отжиг** состоит в нагреве стали до заданной температуры, выдержке при этой температуре до окончания перекристаллизации и медленном охлаждении. В зависимости от того, какую цель преследует отжиг и над какой маркой стали он проводится, устанавливают различные его режимы – температуру нагрева, время выдержки, скорость охлаждения.

При всех видах отжига нельзя допускать перегрев и пережог стали. Перегрев стали – брак исправимый: образовавшуюся крупнозернистую структуру при перегреве можно исправить повторным отжигом. Пережог стали – брак неисправимый, так как сильно окисленные границы кристаллических зерен теряют связь и деталь легко разрушается, особенно на острых ребрах детали.

Нормальная продолжительность нагрева инструментальных сталей при отжиге от 30 до 60 мин на каждые 25 мм толщины изделия. Чем

больше углерода и других примесей в стали, тем медленнее нагревают ее при отжиге во избежание возникновения сильных напряжений и образования трещин в металле.

Разновидностью полного отжига является изотермический отжиг, который чаще всего применяется для легированных штамповых сталей. Процесс изотермического отжига заключается в следующем: заготовку нагревают до указанной температуры полного отжига, при этой температуре выдерживают  $1/5$  часть времени, затрачиваемого на нагрев, после чего сравнительно быстро охлаждают до температуры  $600\text{--}700^{\circ}\text{C}$  и при этой температуре выдерживают от 30 до 60 мин, затем охлаждают на воздухе.

**Нормализация** применяется по отношению к низкоуглеродистым штамповым сталям и часто заменяет отжиг. Нормализация способствует установлению мелкозернистой и однородной структуры заготовки, улучшает обрабатываемость резанием, снимает наклеп с поверхностного слоя заготовок, подвергшихся ковке.

**Закалка** является самым распространенным процессом термической обработки стали. Она необходима для повышения твердости и износостойкости детали оснастки. Закалка производится после завершения механической обработки деталей, перед их чистовым шлифованием и полированием. Качество закалки зависит от правильного выбора температуры нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения.

Температура нагрева под закалку зависит от химического состава стали. Нагрев деталей должен быть достаточно медленным, чтобы не возникли в металле напряжения, вызывающие трещины. Нагрев до повышенных температур не увеличивает твердость стали. Такой нагрев вызывает рост зерна, ухудшает прочность, снижает пластичность, усиливает деформацию и создает опасность образования трещин.

Время нагрева зависит от химического состава стали, от формы и размеров детали. Если нагрев производится в электрических печах, то время нагрева рекомендуется выдерживать в пределах 15–20 мин на 1 мм сечения детали, а при нагреве в соляных ваннах скорость нагрева должна составлять 0,5 мин на 1 мм сечения.

Время выдержки должно быть достаточным, чтобы весь процесс внутренних превращений в стали завершился полностью. Продолжительность выдержки рекомендуется примерно равной  $1/4$  времени нагрева.

Условия охлаждения при закалке имеют большое влияние на качество закалки. Охлаждение в воде создает большую твердость, но в условиях полной прокаливаемости вызывает повышенные внутренние напряжения и деформацию, что ведет к образованию трещин.

При закалке инструментальных углеродистых сталей, для получения высокой твердости и меньшей деформации, условия охлаждения выбирают в зависимости от сечения закаливаемой детали. Детали малого сечения толщиной (диаметром) до 15 мм даже при быстром переносе в охлаждающую среду успевают частично охладиться на воздухе, что затрудняет получение однородной и высокой твердости. Детали толщиной (диаметром) более 30 мм получают чрезмерно тонкий поверхностный закаленный слой с резким переходом к мягкой сердцевине.

На практике стараются не доводить закаливаемую деталь до полного охлаждения в активной охлаждающей среде (воде, растворах солей или щелочей), а, наоборот, доведя охлаждение до 300°C, дальше применяют замедленное охлаждение на воздухе или в сухом песке. Это способствует выравниванию структурных напряжений, а твердость, полученная при закалке, практически не снижается.

Углеродистые инструментальные стали не обладают полной прокаливаемостью (они прокаливаются на глубину лишь 10–12 мм) и это обстоятельство используется в тех случаях, когда нужно получить поверхностно твердую деталь с мягкой, удароустойчивой сердцевиной. В отдельных случаях с этой целью применяют так называемую ступенчатую закалку, осуществляемую путем быстрого охлаждения последовательно в двух различных охлаждающих средах. Первой охлаждающей средой являются растворы солей, а второй – масло, подогретое до температуры 40°С.

Достоинством такого способа закалки является уменьшение термических напряжений, а, следовательно, трещин и коробления, а также хорошее сочетание высокой вязкости с твердостью. Ступенчатую закалку применяют для тонких деталей штампов (сечением до 10 мм) из углеродистых инструментальных сталей и более толстых деталей (сечением до 30 мм) из легированных штамповых сталей.

Наиболее энергичной закаливающей (охлаждающей) средой является холодная вода. Повышение температуры воды или масла уменьшает скорость охлаждения и ослабляет закаливающее влияние жидкости. Поэтому очень важно поддерживать постоянную температуру охлаждающей жидкости. Для этого закалку проводят в проточной воде или ваннах, жидкость которых охлаждается при помощи змеевиков с проточной холодной водой.

**Отпуск** – является завершающей операцией термической обработки деталей оснастки. Рекомендуется производить отпуск непосредственно вслед за закалкой, пока закаленный металл не разрушен напряжениями, возникшими при закалке.

Различают три вида отпуска: низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск производится с целью снятия напряжений в закаленной детали. Он почти не оказывает влияния на твердость стали, структура ее остается неизменной. Нагрев детали производят медленно до температуры 150–250°C и так же медленно охлаждают.

Средний отпуск имеет целью снятие напряжений и получение более вязкой структуры в стали. Нагрев закаленных деталей производят в интервале 250–450°C. Сталь после такого отпуска несколько теряет свою твердость, но получает более высокие механические свойства.

Высокий отпуск осуществляют нагревом закаленной детали до 500–650°C, при этом почти полностью снимаются внутренние напряжения и улучшается структура кристаллов в металле. Однако твердость закалки значительно снижается, особенно для углеродистых инструментальных сталей.

Двойная термическая обработка, заключающаяся в закалке стали и ее последующем высоком отпуске, носит название улучшения.

В процессе отпуска важно добиться заданной температуры и обеспечить выдержку при ней. Продолжительность процесса 30–60 мин. Скорость охлаждения после отпуска существенного значения не имеет. Лишь для некоторых марок легированных сталей, у которых наблюдается отпускная хрупкость (снижение ударной вязкости после отпуска), применяют ускоренное охлаждение в воде или в масле.

**Старение** представляет собой процесс снятия напряжений в металле, возникших в результате механической обработки. Оно заключается в медленном нагреве до низких температур (120–160°C) и выдержке при этих температурах. Применяется старение преимущественно после чернового шлифования при изготовлении деталей, подверженных деформации (тонкие пуансоны, пластины матриц штампов) [2, 16, 36–59, 91, 93].

### **5.3. Неисправности штампового инструмента и пути их устранения**

В зависимости от сложности и объема работы ремонт штампов может быть **текущим (мелкий ремонт), средним и капитальным**.

**Текущий ремонт** заключается в устранении мелких дефектов, например, переточка затупившейся матрицы или пуансона, замена пружин, упоров, фиксаторов или проколочных пуансонов. Такой вид ремонта выполняется обычно непосредственно в штамповочном цехе, на специально отведенном ремонтном участке.

**Средний ремонт** состоит чаще всего в замене одной из основных рабочих частей штампа и нескольких вспомогательных деталей и выполняется обычно в инструментальном цехе.

**Капитальный ремонт** связан с полной разборкой штампа и заменой значительного числа основных и вспомогательных деталей. Трудоемкость такого ремонта может составлять 60–75% общей трудоемкости изготовления штампа.

При капитальном ремонте заменяют пуансоны и матрицы (или их секции) и большую часть вспомогательных деталей. Верхняя и нижняя плиты штампа при этом сохраняются.

Перед ремонтом штампы и бракованные детали тщательно осматривают, чтобы установить вид и причины брака и определить содержание ремонта. При этом составляют карту дефектов либо акт о выходе штампа из строя в результате аварии.

Если штамп вышел из строя в результате аварии (например, сломалась матрица) и ремонт связан с необходимостью изменения конструкции, то на штамп составляют ремонтные чертежи и разрабатывают новый технологический процесс изготовления вышедших из строя деталей.

При разработке технологического процесса на капитальный ремонт штампа прежде всего решается вопрос о целесообразности ремонта, так как иногда его трудоемкость может оказаться близкой к трудоемкости изготовления нового штампа, а срок работы отремонтированного штампа всегда меньше, чем у нового.

Необходимо стремиться к снижению трудоемкости ремонта за счет использования имеющихся деталей вместо их изготовления. Например, лопнувшую матрицу можно отремонтировать, напрессовав на нее обойму из незакаленной или цементированной конструкционной стали.

При ремонте штампов станочные работы составляют примерно 35%, а слесарные – 65%.

Для всех конструкций штампов применяют следующие виды ремонтов: после десяти мелких ремонтов выполняют один средний ремонт, а после двух-трех средних – один капитальный. Общее количество ремонтов зависит от типа штампа и материала, из которого изготовлены его рабочие части.

В табл. 5.1 приведены типичные примеры брака штампуемых деталей или неполадок при штамповке, зависящие от неисправности штампов, и указаны способы их устранения.

Некоторые из этих неполадок по характеру и причинам возникновения сходны с неполадками, возникающими при плохом качестве изготовления штампов, но способы их устранения имеют свои особенности, поскольку штампы уже были в употреблении.

Таблица 5.1. Неисправности штампов и способы их устранения

Неисправности	Характер и причины их возникновения	Способы устранения
<b>Дыропробивные, вырубные и обрезные штампы</b>		
Заусенцы на штампованной детали после вырубки, пробивки	Затуплена режущая кромка	Прошлифовать торец пуансона или зеркало матрицы
	Велик зазор между пуансоном и матрицей	Подогнать зазор до нормального
	Пуансон сместился по отношению к матрице	Установить равномерный зазор по всему периметру режущих кромок штампа
	Сместились секции матрицы	Посадить секции в гнездо или поставить шпонки
	Не обеспечивается точное направление верхней части штампа по отношению к нижней	Заменить втулки или направляющие колонки
Вмятина на отштампованной детали около пробитого отверстия	Неплотно прилегает штампуемый материал к матрице	Увеличить предварительное сжатие пружин съемника
	Сила пружин недостаточна	Установить пружины с большей допустимой нагрузкой. Увеличить количество пружин
Срез режущих кромок штампа	Режущие части штампа сместились	Установить равномерный зазор по всему периметру режущих кромок штампа
	Большой люфт колонок во втулках	Сменить втулки
	Опорная плоскость ползуна прессы не параллельна плоскости стола	Потребовать ремонта прессы
	Плиты штампа не параллельны	Прошлифовать плиты
	Резание проходит неодновременно по периметру режущего контура, начинается по одной стороне штампа	Устранить шлифованием не параллельность режущих кромок пуансона и матрицы
Резкое сотрясение прессы при вырубке	Велико усилие резания при отсутствии скосов на режущей кромке матрицы	Прошлифовать зеркало матрицы, сделав скосы
Съемник не снимает полосу	Сила пружины недостаточна	Заменить пружину
<b>Гибочные и формовочные штампы</b>		
Отштампованная деталь не имеет заданных размеров	Штампуемый металл имеет упругую деформацию	Изменить рабочие части штампа с учетом упругой деформации металла
	Заготовка смещается в начале гибки или формовки	Обеспечить прижим заготовки в штампе
	При малой величине отгибаемого участка угол гибки получается меньше требуемого	Придать дну матрицы такую форму, чтобы согнутые криволинейные частки штампуемой детали подвергались достаточно сильному сжатию
	Неточность фиксирующего устройства	Исправить фиксаторы или поставить новые



Окончание таблицы 5.1

На отогнутых участках имеются задиры	Мал зазор между пуансоном и матрицей	Увеличить зазор
	Твердость матрицы недостаточна	Хромировать или азотировать матрицу
Отгибаемый борт получается волнистым при формовочных операциях	Велик зазор между пуансоном и матрицей	Уменьшить зазор
<b>Вытяжные штампы</b>		
Блестящие следы на боковой части штампованной детали	Пуансон сместился относительно матрицы	Установить пуансон так, чтобы его ось совпала с осью отверстия матрицы
Задир на штампованной детали	Зазор между пуансоном и матрицей не соответствует толщине материала	Увеличить зазор
	Недостаточная твердость матрицы	Хромировать или азотировать пуансон и матрицу
Разрыв металла на цилиндрической части детали. Фланец детали имеет блестящие следы	Велико давление прижима	Уменьшить давление прижима
Разрыв металла при последующей вытяжке	То же	То же
Отрыв дна детали при последующей вытяжке	То же	То же
Складки на фланце и морщины на стенках отштампованной детали	Применяется несоответствующая смазка	Заменить смазку
	Ослабло давление прижима	Увеличить давление прижима
При вытяжке полого цилиндра без фланца получается скошенный торец	Зазор между пуансоном и матрицей неравномерный Выталкиватель мал по диаметру	Сделать зазор равномерным Увеличить диаметр выталкивателя
Волны или морщины на стенках прямоугольной или несимметричной детали	Размеры заготовки неправильны	Уточнить размеры заготовки по чертежу и шаблону
Разрыв болтов, крепящих пуансон или матрицу, при ходе пресса	Зазор между пуансоном и матрицей менее толщины штампуемого металла	Увеличить количество стержней прижима. Увеличить зазор между пуансоном и матрицей
Прижим не доходит до верхней плоскости пуансона после первых ходов пресса	Согнулись стержни прижима	Поставить новые стержни

#### **5.4. Износ штампового инструмента и способы его восстановления**

В вырубных и дыропробивных штампах износ пуансонов и матриц выражается в затуплении их режущих кромок, что устраняется переточкой рабочей части. При нормальном износе переточкой снимается слой металла, равный 0,1–0,15 мм. Поэтому штамп может выдержать 15–25 переточек до полного износа матрицы или пуансона.

Пуансон после первого износа можно не выбрасывать, а переделать с одного типа или размера на другой, тогда расход металла на изготовление пуансонов сократится.

При изготовлении или ремонте штампов, предназначенных для вырубки заготовок из мягких материалов, можно закаливать только матрицу, а пуансон оставлять незакаленным. Когда в процессе работы пуансон затупится, можно снять верхнюю часть штампа и легкими частыми ударами молотка осадить всю рабочую кромку пуансона, увеличив этим размеры его рабочей части.

Затем верхнюю часть штампа ставят на место и под прессом вдавливают пуансон в матрицу, благодаря чему незакаленный пуансон получает контур и размер окна закаленной матрицы. После этого правят края пуансона для получения нужного зазора и затачивают его торец на плоскошлифовальном станке.

Вкладная матрица в результате многократной заточки может быть сошлифована настолько, что не будет выступать из нижней плиты. Срок ее службы можно продлить, если под матрицу положить стальную шлифованную прокладку и снова шлифовать рабочую поверхность.

Матрицы с небольшими трещинами можно заключить в стальную обойму. Для этого изготавливают обойму, внутренние размеры которой уменьшены по сравнению с наружными размерами матрицы на величину натяга при горячей посадке. Обойму нагревают и напрессовывают на

холодную матрицу. После остывания обойма плотно сжимает матрицу, и трещина закрывается.

Часто при вырубке материалов толщиной до 3 мм с целью экономии инструментальной стали, а также в случаях, когда в результате многократных переточек зеркала матрицы ее рабочее отверстие теряет свои размеры, применяют матрицы, состоящие из двух частей: опоры-матрицы и накладной пластины-матрицы. Пластину-матрицу изготавливают из листового проката толщиной 6–8 мм из стали У8А, У10А. Твердость пластины-матрицы после закалки должна составлять HRC 58–60. Опору матрицы изготавливают из стали 50 толщиной 30–40 мм и тоже закаливают до твердости HRC 52–54.

Уклон рабочего отверстия пластины-матрицы берут равным 10–30', уклон провального окна опоры-матрицы разделявают до 1,5–3,0°. Свисание режущей кромки пластины-матрицы над провальным окном опоры допускается не более 0,5 мм на сторону, иначе может произойти преждевременная поломка пластины-матрицы.

Соприкасающиеся плоскости пластины-матрицы и опоры тщательно шлифуют, с целью обеспечить плотное прилегание их друг к другу.

Накладную пластину-матрицу заменяют, когда ее толщина уменьшится до 3 мм.

Способы восстановления изношенных матриц: замена сломанного зуба в матрице вставкой, наплавка изношенной режущей кромки твердым сплавом, форма фаски на режущих кромках обрезных штампов.

Матрицы с выкрошившимися частями можно восстановить изготовлением точно подогнанной вставки. Для этого матрицу отжигают, поврежденный участок вырезают (например, в форме ласточкина хвоста) и к нему точно подгоняют вкладыш из той же стали, из которой сделана матрица. Вкладыш запрессовывают в матрицу и приваривают

электросваркой с тыльной стороны (перед запрессовкой разделяют место под сварку). После постановки вкладыша матрицу подвергают термической обработке, затем шлифуют и доводят контурное окно.

Пуансоны и ножи, укороченные в результате переточек, наращивают вставками. Такие пуансоны состоят из двух частей: хвостовика и рабочей части, изготавливаемой из легированной инструментальной стали. Бывшую в употреблении часть пуансона отжигают, высверливают и нарезают в ней отверстия для крепления рабочей части, которую подгоняют по матрице, закаляют и крепят к хвостовику. Хвостовую часть вновь не закаляют. При износе рабочей части ее заменяют снова, а хвостовик остается прежний.

Ножи для рубки металла, как и пуансоны, изготавливают с наставкой, прикрепляемой упорной планкой и винтом. Ножи восстанавливают сменой наставок. Изношенные направляющие колонки заменяют новыми, и к ним ставят новые втулки.

При сильной изношенности рабочих кромок средних и крупных штампов на большинстве заводов применяют электродуговую наплавку их специальными электродами.

Для восстановления рабочих деталей штампов, изготовленных из сталей марок У8А, У10А, применяют наплавку электродом, изготовленным из малоуглеродистой проволоки, покрытой специальной обмазкой, состоящей из 49% феррохрома, 2% черного графита, 16% плавикового шпата, 11% титанового концентрата и 22% мела. К общему количеству сухой смеси обмазки добавляют 25–30% жидкого стекла концентрацией 1,33–1,34%. Обмазку наносят окунанием и сушат детали на воздухе 12–15 ч, а затем 1,5 ч закаляют в печи при температуре 180–200°C. При диаметре стержня 3 мм толщина покрытия на сторону составляет 2 мм; при диаметре 4–1,4 мм; при диаметре 5–1,7 мм. Силу тока

при наплавке применяют от 80–100 А (при диаметре электрода 3 мм) до 170–200 А (при диаметре электрода 5 мм).

В качестве примера можно указать способ восстановления матриц наплавкой режущей кромки твердым сплавом – для этого в изношенной матрице снимают фаску под углом 30°, а затем выполняют электродуговую наплавку сплавом, после наплавки слоя его обрабатывают абразивными или алмазными головками для восстановления формы и нужных размеров матрицы.

Рабочие части обрезаемых, пробивных и гибочных штампов наплавляют литыми твердыми сплавами сормайт № 1 или сормайт № 2.

При наплавке сормайта применяют ацетиленокислородное пламя. Для получения высокого качества наплавки необходимо правильно выбрать режим ацетиленокислородного пламени. При правильном режиме наплавки основной металл не расплавляется, а доводится до состояния «запотевания» (появление на поверхности блестящей подвижной пленки – «пота»).

Наплавку выполняют в следующем порядке: осматривают деталь, и если она имеет трещины и повреждения, то не наплавляют ее; отжигают деталь, чтобы придать материалу однообразную структуру (закаленные детали при наплавке будут неизбежно деформироваться и давать трещины); снимают фаски и делают выточки по периметру наплавки; глубина фаски определяется толщиной рабочего слоя наплавки (от 0,5 до 2 мм); фаску у режущей кромки выполняют с таким расчетом, чтобы по мере удаления от края режущей кромки она сходилась на нет; при снятии фаски не оставляют острых кромок и грубых рисок; ширину режущей кромки принимают от 5 до 10 мм, в зависимости от ширины рабочей поверхности детали; зачищают наплавляемую поверхность от окалины, масла, ржавчины и грязи до металлического блеска; подбирают пруток сормайта диаметром 3–4 мм или оттягивают его до этого диаметра, так как именно

такой пруток дает наиболее хороший слой при наплавке; готовят угольные и графитовые пасты (чтобы придать правильную форму слою твердого сплава, нужно оградить некоторые места детали от попадания на них твердого сплава); покрывают деталь твердым сплавом; во время работы горелку держат под углом 25–30° к наплавляемой поверхности, а пруток – перпендикулярно к направлению пламени горелки и все время следят за тем, чтобы состав смеси ацетилена и кислорода не изменялся, так как он влияет на температуру пламени.

При наплавке восстановительное пламя должно обладать избытком ацетилена. Перед наплавкой основной металл прогревают на горне с древесным углем, в электрической или муфельной печи до температуры 600–650°C. Затем место наплавки пламенем горелки разогревают до «запотевания» (или появления на наплавляемой поверхности первых признаков расплавления), и в этот момент в пламя быстро вводят прутки и выполняют наплавку, держа головку на расстоянии 3–5 мм от поверхности. Работу выполняют плавно и достаточно быстро. Толщина наносимого слоя от 1,5 до 2,5 мм.

Образовавшуюся в расплавленном металле окалину и шлак сдувают пламенем горелки, а наплавленную поверхность, если она получилась неровной, выравнивают (расплавляя места, где слой твердого сплава наложен неравномерно).

После наплавки штамп помещают в теплый песок для медленного остывания.

Наплавленные детали отжигают при температуре 850–900°C с выдержкой 2–4 ч и последующим охлаждением в масле; отпуск производят при температуре 450–600°C с выдержкой 1 ч.

После отжига сормайт № 2 легко обрабатывается режущим инструментом. После закалки его обрабатывают шлифованием.

Чтобы увеличить срок службы штампов для холодной штамповки и высадки, применяют рабочие вставки к штампам, изготовленные из металлокерамических твердых сплавов вольфрамокобальтовой группы.

Особенно широко применяются штампы, армированные твердосплавными вставками, в крупносерийном и массовом производстве, где стойкость обычных стальных матриц и пуансонов оказывается недостаточной и приводит к необходимости изготовления большого числа штампов-дублеров. С применением твердых сплавов для вырубных штампов стойкость их увеличивается в 8 и более раз, а при штамповке высокопрочных листовых материалов типа нержавеющей, электротехнических и им подобных сталей применение твердых сплавов для рабочих частей штампов позволяет повысить их стойкость до 50 раз [2, 36, 64, 90].

Штампы с твердосплавными вставками отличаются от стальных некоторыми конструктивными особенностями, что определяется физико-механическими свойствами твердого сплава. При конструировании и изготовлении таких штампов необходимо обеспечить: повышенную жесткость конструкции штампа; повышенную износостойкость и точность направляющих колонок, втулок, направляющих планок, упоров и других элементов штампа; надежное крепление твердосплавных вставок с тщательной пригонкой их к опорным поверхностям; минимальный вход пуансона в матрицу с применением ограничивающих упоров; устранение влияния неточности движения ползуна прессы на штамп путем применения «плавающих» хвостовиков и симметричного расположения направляющих колонок относительно вырезаемого контура; увеличение зазоров между пуансоном и матрицей.

Детали, изготовленные из твердых сплавов, могут быть прикреплены к основаниям пуансонов и матриц не только запрессовкой, но и припаяны твердыми припоями, закреплены клиньями и винтами. Механическое

крепление наиболее надежно и обеспечивает наибольший срок службы штампов.

Ремонт штампов, оснащенных вставками из твердых сплавов, состоит в удалении с рабочей поверхности твердосплавной вставки, рисок, задигов, налипших частиц штампуемого металла.

При замене обойму матрицы подогревают газовой горелкой и выпрессовывают твердосплавную вставку из гнезда. На место изношенной вставки запрессовывают новую вставку с натягом в 1,5% от диаметра вставки.

Шлифование вставок выполняют алмазными кругами марок АПП200×10×75 или АПП250×15×75 зернистостью АСЮ-АС12 на металлической связке 100%-ной концентрации. Можно применять и абразивные круги из карбида кремния зеленого КЗ зернистостью 25 (ГОСТ 3647–80) твердостью СМ1-СМ3.

При шлифовании по наружному и внутреннему диаметрам применяют головки и круги из синтетических алмазов на металлической или бакелитовой связках: АПП250×10×3×75 зернистостью А6; АПП200×10×3×32 зернистостью А10; шлифовальные головки диаметром 12, 10 и 8 мм зернистостью А6 и А12. Окружная скорость круга при шлифовании 25–30 м/с. Матрицы шлифуют с применением керосина или охлаждающей жидкости следующего состава (в %): тринатрийфосфат – 0,60, кальцинированная сода – 0,25, бура – 0,30, нитрит натрия – 0,10, вазелиновое масло – 0,05, вода – 98,70.

Частицы налипшего металла, задиры и риски удаляют также полированием на токарном или сверлильном станке при 6000–10 000 об/мин, при помощи чугунного притира, шаржированного карбидом бура № 230–320, замешанного на машинном масле, или с применением алмазных паст.



Удар струи расплава о стенку матрицы или стержня постепенно изнашивает их поверхность, что сказывается на качестве поверхности отливки. Таким образом, шероховатость поверхности отливки зависит от продолжительности эксплуатации формы. Полость формы, обработанная полированием или отделочным шлифованием, обеспечивает 7–8-й класс чистоты поверхности отливок.

Оформляющая полость формы после отливки 8000–10 000 деталей из алюминиевых сплавов покрывается сеткой трещин (так называемый «разгар»), которая оставляет на отливке мелкий сетчатый узор. Из-за взаимодействия высоких температур выгорают углы на рабочих торцах выталкивателей, что приводит к образованию заусенцев на отливке.

Чтобы облегчить исправление этих дефектов на отливках, проводят профилактическую зачистку полости формы, применяют более теплостойкие материалы для формы и строго соблюдают технологический режим процесса литья.

Износ оформляющих поверхностей в результате ударного воздействия струи расплавленного металла – наиболее распространенный дефект, возникающий в процессе эксплуатации формы.

Часто, как следствие разгара, сплав налипает на поверхность оформляющих деталей формы. Обычно налипание происходит в местах нарушения чистоты поверхности. Если сплав налипает на стенке знака, вдоль которого происходит сталкивание отливки, то налипшие частицы царапают поверхность отливки при съеме, что приводит к браку. При появлении подобного дефекта необходимо тщательно зачистить и отполировать поврежденное место формы, иначе периодическое налипание и брак отливок неизбежны.

Налипание (или привар) металла в плоскости разъема формы также приводит к неполадкам в работе. Для предотвращения этого плоскости

разъема формы обрабатывают до более высокого класса чистоты и внимательно следят за их состоянием во время эксплуатации формы. Частицы металла, не удаленные с плоскости разъема, не позволяют форме полностью сомкнуться, что приводит к потере точности размеров отливки и выбросу металла в образовавшийся зазор. На месте не удаленных вовремя с плоскости разъема частиц сплава увеличивается шероховатость поверхности, что способствует повторному налипанию.

Одной из распространенных неполадок формы, в которую расплав впускается непосредственно против тонких оформляющих стержней, является частая поломка стержней. При проектировании формы стараются избежать этого и направить поток расплава мимо оформляющих элементов малых сечений, подверженных выгоранию на кромках и поломкам.

Подвижные направляющие и фиксирующие элементы формы – колонки, шиберы, наклонные направляющие пальцы – работают в тяжелых условиях одностороннего воздействия давления в момент запрессовки и высокой температуры расплава.

Во время работы тщательно следят за состоянием рабочих поверхностей этих элементов. Не удаленная вовремя даже мелкая капля металла может вызвать царапину, быстро приводящую к глубокой борозде и задиру на сопрягаемых поверхностях, что вызывает поломку элементов формы и выход ее из строя.

К часто встречающимся неполадкам в работе формы, возникающим при эксплуатации, относится также поломка длинных толкателей малого сечения, которая появляется в результате перекосов системы выталкивания. Это объясняется обычно повышенным износом направляющих механизма выталкивания. Для предотвращения такого дефекта регулярно смазывают подвижные элементы системы выталкивания формы и следят за регулированием толкающих упоров на

машине. Местный размыв металлом поверхности оформляющего стержня иногда приводит к возникновению так называемых поднутрений, вызывающих царапины и задиры на отливках при выталкивании. Так же, как и разгар, этот дефект появляется в работе формы после длительной ее эксплуатации.

В табл. 5.2 приведены типичные виды и меры устранения брака при литье под давлением.

Таблица 5.2. Брак при литье металлов под давлением и меры его устранения

Виды брака	Причины	Меры устранения
Несоответствие геометрии отливки требованиям чертежа	Неправильное определение усадки; неточное изготовление формы; коробление отливки из-за недостаточной жесткости конструкции	Исправить размеры форм в соответствии с правильно подсчитанной усадкой; привести размеры формы в соответствие с чертежом отливки; проверить работу толкателей с тем, чтобы устранить выталкивание отливки из формы с перекосом. При необходимости ввести дополнительные толкатели или изменить их форму. Ввести в соответствующих местах отливки ребра жесткости
Надиры на поверхностях отливки	Мал литейный уклон: забоины на стержнях и в форме; приваривание сплава к стержням и форме; недостаточная смазка; высокая температура заливаемого сплава	Исправить форму; устранить забоины; увеличить содержание железа в алюминиевых сплавах до 1,5%; уменьшить скорость впуска металла в форму; увеличить смазку в местах приваривания; снизить температуру заливки

## Окончание таблицы 5.2

Трещины в отливках из медных сплавов	Замедленное удаление стержней из отливки и отливки из формы; холодная форма; повышенное содержание цинка или кремния в сплаве	Ускорить выемку отливки из формы; заменить сплав
Неслитины, нечеткое выполнение острых контуров отливки	Неправильное расположение питателя; малое давление на металл; слишком большое сечение питателя и малая скорость заполнения; холодные формы или металл	Подвести питатель так, чтобы не было раздробленности струи; уменьшить сечение выпуска и увеличить скорость прессования; повысить температуру; повысить давление в сети
Воздушная пористость во всех сечениях отливки	Неправильное расположение питателя; большая скорость потока металла; неправильная или недостаточная вентиляция формы	Увеличить сечение выпуска; исправить вентиляционную систему; направить металл так, чтобы воздух постепенно вытеснялся из формы; уменьшить скорость прессования
Узорчатая поверхность отливки («мороз»)	Слишком тонкое сечение впуска; низкая температура заливки; холодная форма	Увеличить сечение впуска; повысить температуру заливки; подогреть форму
Усадочная пористость и раковины в утолщениях	Плохая конструкция отливки; отсутствие питания утолщенного места отливки	Обеспечить разностепенность отливки; подвести питатель к утолщенному месту или армировать это место вкладышем из того же сплава
Трещины в отливках из сплавов алюминия с магнием	Наличие резких переходов от тонких сечений отливки к толстым; холодная форма; повышенное содержание магния в сплаве	Изменить конструкцию детали, скруглить переходы; подогреть форму; добавить в сплав чистого алюминия
Трещины в отливках из магниевых сплавов	Наличие резких переходов в отливках; холодная форма; перекося отливки при удалении из формы; повышенное содержание кремния или алюминия	Ввести радиусы перехода, подогреть форму; отрегулировать работу выталкивателя; добавить в сплав магния или заменить сплав
Трещины в отливках из цинкованных сплавов	Перекося при удалении отливки из формы; слишком быстрое удаление отливки из формы; повышенное содержание свинца в сплаве	Отрегулировать ход плиты выталкивателей; увеличить время выдержки отливки в форме; заменить сплав новым

Наиболее распространен ремонт пресс-форм с целью устранения поверхностных повреждений, полученных в результате разгара. При этом большое значение имеет своевременность такого ремонта, так как появившиеся при разгаре микротрещины быстро увеличиваются и через некоторое время не удастся удалить их без нарушения размеров оформляющей полости.

Рекомендуется восстанавливать чистоту поверхности оформляющих деталей во время профилактического ремонта, назначаемого после выполнения определенного количества отливок. Ремонт поврежденной поверхности выполняется шлифованием, доводкой и полированием.

Техническое состояние формы во многом зависит от соблюдения требований эксплуатации. Особенно тщательно нужно следить за чистотой поверхности разъема формы, так как оставшийся облой может привести к выбросу металла по разъему и попаданию его в подвижные механизмы формы.

Плоскость разъема чаще других мест формы требует ремонта. При малейших дефектах ее обычно шлифуют и доводят. Для облегчения этих операций, а также для создания большего удельного давления в зоне смыкания обеих половин формы величину контактной поверхности в плоскости разъема стараются уменьшить.

Один из видов ремонта формы состоит в периодической замене быстроизнашивающихся деталей.

Поверхность формы, расположенная против литника, быстро изнашивается. Для увеличения срока эксплуатации и упрощения ремонта формы в этом месте обычно устанавливают рассекатель. Установка рассекателя изменяет направление струи металла и смягчает ее удар о противоположную стенку матрицы.

Применение рассекателя улучшает условия впрыска металла, так как струя плавно переходит от круглого сечения к плоскому и поток делается равномерным. Облегчая условия работы формы, рассекатель удлиняет срок ее эксплуатации. Сам рассекатель быстро изнашивается, и поэтому его делают сменным.

К часто сменяемым деталям относится и литниковая втулка, предохраняющая от износа неподвижную плиту формы.

### **Контрольные вопросы к разделу**

1. Какие способы повышения надежности кузнечно-штамповочного оборудования вам известны?

2. Опишите основные способы повышения надежности и качества поверхностного слоя штамповой оснастки за счет термической обработки.

3. Как производят восстановление штампов?

4. Каким образом исправляют брак при эксплуатации гибочных штампов?

5. Каким образом исправляют брак при эксплуатации вырубных штампов?

6. Каким образом исправляют брак при эксплуатации штампов горячей штамповки?

## **РАЗДЕЛ 6. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В данном разделе представлены лабораторные работы по дисциплине «Технологические методы повышения надежности и работоспособности средств технологического оснащения».

### **6.1. Лабораторная работа №1**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ КОРРОЗИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ**

**Цель работы:** Освоить способ испытания конструкционных материалов в условиях их коррозионного изнашивания методом «до отказа», научиться экспериментально устанавливать закон распределения отказов и недетерминированные показатели надежности конструкционных материалов на основе теоретических положений теории надежности.

#### **Методические указания**

Коррозионно-механическое изнашивание – разрушение трущейся поверхности детали, обусловленное одновременно внешним механическим воздействием и интенсивным коррозионным процессом в поверхностных слоях.

Возможны следующие разновидности коррозионно-механического изнашивания: при воздействии жидкой или газовой агрессивной среды; изнашивание, усиленное окислением атмосферы; изнашивание при наличии вибрации – фреттинг-коррозия [97].

Окислительное изнашивание является самой распространенной разновидностью коррозионно-механического изнашивания. Так, при трении (подшипники скольжения и качения) происходит окисление

металла кислородом воздуха. На поверхности детали образуются хрупкие и твердые пленки окислов, которые разрушаясь, обнажают новые слои металла. Продукты изнашивания отделяются в виде порошка или частиц окислов, которые в свою очередь могут являться причиной механического (абразивного) изнашивания. Интенсивность процесса при окислительном изнашивании меньше, чем при всех других видах изнашивания, и в деталях машин она составляет не более 0,05 мкм/ч. Окислительное разрушение также имеет место в емкостях, аппаратах, мерниках, дозаторах и т.д., а также в металлоконструкциях, расположенных вне производственного помещения, площадках обслуживания, металлических балках и перекрытиях цехов.

Одной из основных задач проблемы надежности и долговечности является разработка методов контроля и определения числовых значений показателей надежности и долговечности технологического оборудования. Эта задача решается методами обработки данных эксплуатационных наблюдений и ускоренных испытаний, а также расчетным путем.

Метод эксплуатационных наблюдений наиболее распространен. При этом следует учитывать, что долговечность оборудования может исчисляться тысячами часов и за этот период накопленная информация стареет, а изделие может быть модернизировано, в том числе и с применением новых технологий.

Расчетный метод в настоящее время еще не оформился в инженерный метод из-за сложности задачи, ее новизны и недостаточного количества фактических и опытных данных. Поэтому в настоящее время наиболее экономически целесообразным является метод ускоренных испытаний, дающий возможность судить о надежности и долговечности изделий в нормальных условиях эксплуатации по значению



соответствующих показателей при форсированных режимах (повышенные нагрузки, скорости, температуры, концентрации реагентов и т.д.).

Методы испытаний (в том числе и ускоренных испытаний) конструкционных материалов в условиях их коррозионного изнашивания должны удовлетворять следующим требованиям:

1) Принудительное ускорение коррозионного процесса при проведении ускоренных испытаний не должно изменять сам механизм коррозии. Сокращение времени испытаний за счет увеличения агрессивности среды может вызвать изменение характера процесса, свойств продуктов коррозии и их распределения по поверхности, защитных свойств пленок и интенсивность коррозии. Для материалов, мало отличающихся по коррозионной стойкости, продолжительность испытания должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы это различие можно было оценить;

2) При выборе ускоренного метода испытания нужно учитывать состав и свойства коррозионной среды, в которой будут эксплуатироваться изделия;

3) Ускоренный метод испытания должен учитывать условия работы изделия;

4) Ускоренные методы испытаний необходимо разрабатывать и выбирать для каждой группы конструкционных материалов в отдельности;

5) Следует правильно выбирать показатель коррозии. Для количественного выражения скорости коррозии металлов приняты показатели коррозии: глубинный, изменения массы, объемный, механический и другие. Весовой показатель, удовлетворительно отражающий поведение стали, меди и цинка, не всегда применим к алюминиевым сплавам и нержавеющей сталям. Поведение последних металлов оценивается наиболее правильно по глубине проникновения коррозии и коэффициенту ее неравномерности;

6) Ускоренные испытания следует по возможности использовать для получения сравнительных данных. При испытаниях новых сплавов или средств защиты необходимо параллельно испытывать родственные сплавы или покрытия, по которым уже имеются надежные данные об их коррозионном изнашивании.

Методы ускоренных испытаний классифицируются по характеру создаваемых условий:

- при полном погружении в электролит;
- при периодическом погружении в электролит;
- при периодическом обрызгивании электролитом;
- в атмосфере с постоянной влажностью;
- в атмосфере с постоянной влажностью в присутствии коррозионных агентов;
- воспроизводящие условия конденсации.

На практике применяют следующие методы оценки коррозионной стойкости:

- **весовой** метод (по изменению массы образцов) – наиболее простой и надежный. Применяется в случаях, когда коррозия имеет равномерный характер, а также при изучении коррозии малоуглеродистых сталей, цинка и меди;
- **объемный** метод (по изменению количества выделившегося в процессе коррозии водорода или количества поглощенного кислорода) – в 10–100 раз более точен весового. Применяется, когда процесс коррозии идет преимущественно с выделением водорода или с поглощением кислорода;
- **по глубине проникновения коррозии** – этот метод применяется, когда коррозия носит неравномерный характер, что

наблюдается, например, на алюминиевых сплавах, низколегированных и нержавеющей сталях;

- **по изменению механических свойств материала** – часто используется при изучении коррозии алюминиевых сплавов;
- **по изменению отражательной способности поверхности металла** – применяют при изучении начальных стадий коррозии, а также для изучения коррозии декоративных покрытий, нержавеющей сталей;
- **по изменению электрического сопротивления;**
- **по времени появления первого коррозионного очага или определенной площади коррозии;**
- **по определению количества металла, перешедшего в раствор в процессе коррозии.**

Методика испытаний на надежность зависит, в первую очередь, от степени восстанавливаемости изделия. В случае восстанавливаемых изделий испытывается либо множество изделий до первого отказа, либо единицы с проведением ремонтов (первый вариант более обоснован статистически, второй является экономически целесообразным). В случае невозстанавливаемых объектов испытывается множество изделий до отказа.

Установка для испытания надежности конструкционных материалов методом «до отказа» в условиях их коррозионного изнашивания состоит (рис. 6.1) из стойки 1, диска 2, на котором закреплены 12 пневматических датчиков 3 (рис. 6.2). Корпус 1 пневматического датчика отказов (рис. 6.2) имеет пустотелую камеру 2. Испытуемый образец 3 толщиной  $\delta$  герметично фиксируется с помощью винтов, прокладки и фланца. Пустотелая камера 2 соединяется гибким шлангом 6 (рис. 6.1) с датчиком определения момента потери герметичности.

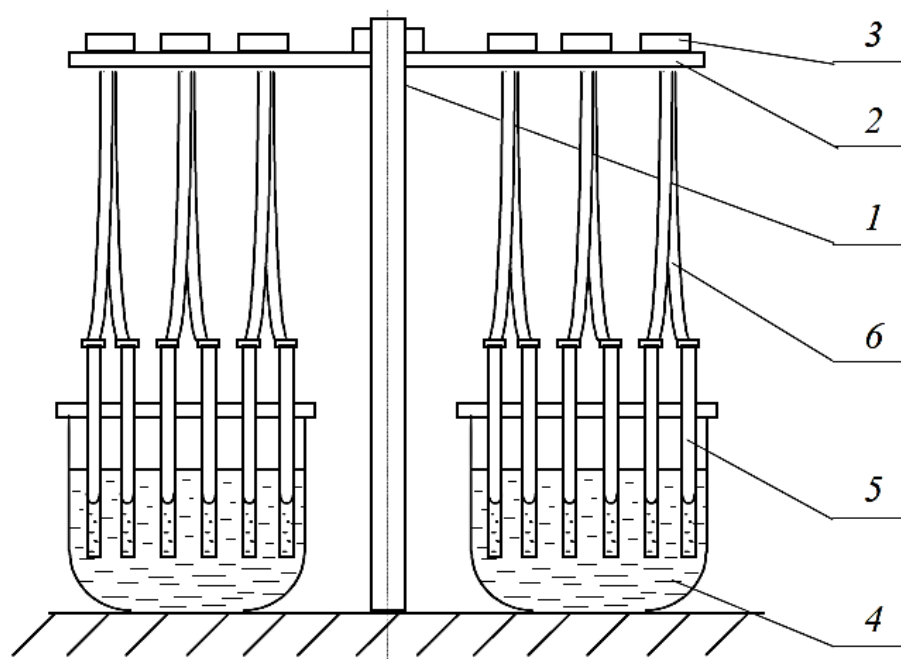


Рис. 6.1. Схема лабораторной установки:

1 – стойка, 2 – диск, 3 – пневматический датчик, 4 – сосуд, 5 – колба, 6 – гибкий шланг

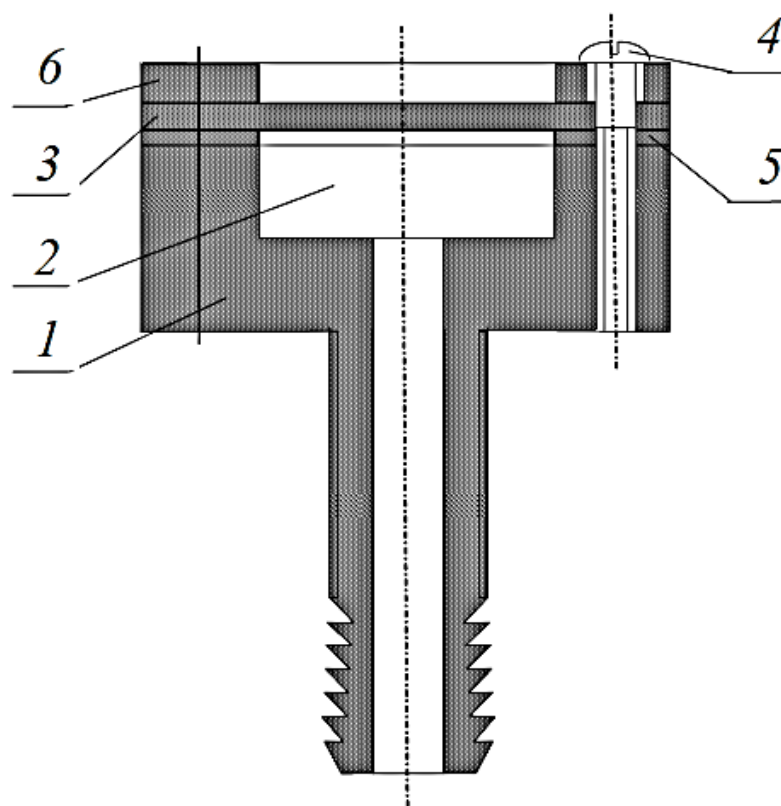


Рис. 6.2. Пневматический датчик отказов:

1 – корпус, 2 – камера, 3 образец, 4 – винт, 5 – прокладка, 6 – фланец

Датчик (рис. 6.2) определения момента потери герметичности состоит из сосуда 4, заполненного водой и сообщающегося с атмосферой, а также стеклянной трубки 5, погруженной в воду на некоторую глубину (100–200 мм).

Установка размещается в вытяжном шкафу и работает следующим образом. Включается вытяжной вентилятор вытяжного шкафа. На исследуемый плоский образец конструкционного материала пипеткой наносится определенное количество кислоты. Момент отказа (разрыв испытуемого образца) фиксируется изменением уровня воды в стеклянной трубке 5.

Исходные данные для выполнения лабораторной работы представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Исходные данные

№ обр.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	t <sub>i</sub> , сек	5	15	15	12	16	4	12	18	19	13	9	8	13	17	7
2		4	13	12	13	15	3	12	15	20	14	8	5	13	18	9
3		3	12	14	14	14	4	13	18	21	13	7	8	14	19	7
4		4	14	11	12	16	3	14	19	20	12	6	9	13	17	6
5		5	15	15	13	16	4	13	17	19	12	8	7	14	18	8
6		6	15	15	13	14	3	14	18	19	14	7	6	13	18	9
7		5	16	13	14	14	2	13	18	20	13	9	8	14	19	7
8		4	13	11	15	15	5	12	15	21	12	8	9	13	17	6
9		3	16	16	12	13	3	12	17	20	12	7	7	14	18	8
10		2	12	17	11	16	4	11	18	19	11	9	8	12	18	5

### Порядок выполнения работы

1. Записать в тетрадь теоретическую часть (методические указания).  
Выбрать исходные данные по варианту (табл. 6.1).

2. Весь интервал времени, в течении которого проводились испытания, разбить на равные участки  $\Delta t_i = \text{const}$ . Интервалы, на которые нужно разделять, сделать равными 5 секундам (с 1 до 5, с 6 до 10, с 11 до 15 и т.д.).

3. Для каждого из участков определить частоту отказов по формуле:

$$H_i = \frac{\Delta n_i}{\Delta t_i},$$

где  $\Delta n_i$  – количество отказов,  $\Delta t_i$  – величина интервала времени, в котором произошли эти отказы.

4. Построить гистограмму отказов – ступенчатый график, состоящий из прямоугольников, у которых основаниями служат частотные интервалы (наработки на отказ), а площади равны числу случаев попадания в этот интервал наработок.

5. Вычислить статистические оценки показателей надежности исследуемого конструкционного материала по формулам:

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n},$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{T})^2},$$

где  $\bar{T}$  – средняя наработка на отказ конструкционного материала толщиной  $\delta$ , с;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение наработки до отказа, с.

6. Определить доверительные границы средней наработки до отказа конструкционного материала по формулам:

$$T_1 < \bar{T} < T_2,$$

$$T_1 = \bar{T} - \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}},$$

$$T_2 = \bar{T} + \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}},$$

где  $\Pi=1,72$  – нормировочный параметр, зависящий от величины  $n_i$ .

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое коррозионно-механическое изнашивание? Какие разновидности коррозионно-механического изнашивания вы знаете?
2. Поясните механизм окислительного изнашивания.
3. Какие методы применяются для контроля и определения числовых значений показателей надежности и долговечности технологического оборудования?
4. Перечислите требования, которым должны удовлетворять методы испытаний конструкционных материалов в условиях их коррозионного изнашивания.
5. Как классифицируются методы ускоренных испытаний по характеру создаваемых условий?
6. Какие существуют методы оценки коррозионной стойкости?
7. Объясните назначение пневматического датчика отказов, его устройство и принцип действия.
8. В чем заключается метод испытания конструкционного материала «до отказа»? Перечислите преимущества и недостатки этого метода.
9. Объясните устройство и принцип действия лабораторной установки.
10. Опишите методику проведения эксперимента.
11. В чем заключается методика выявления закона распределения наработки на отказ?
12. Каким образом строится гистограмма отказов?

## **6.2. Лабораторная работа №2**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ КОРРОЗИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

**Цель работы:** Освоить способ испытания конструкционных материалов при коррозионном изнашивании в условиях повышенных температур, научиться экспериментально устанавливать закон распределения отказов и недетерминированные показатели надежности конструкционных материалов на основе теоретических положений теории надежности.

#### **Методические указания**

Коррозионные испытания при повышенных температурах проводят в статических и динамических условиях.

Преимуществами испытания в статических условиях являются простота и компактность оборудования. Так, например, испытания в ампулах можно проводить в обычных лабораторных условиях. Однако, при этом не создаются реальные условия, в которых работает конструкционный материал (например, движение коррозионной среды – теплоноситель в теплоиспользующих установках движется с довольно большой скоростью). Тем не менее результаты статических испытаний можно рассматривать как предварительную оценку коррозионной стойкости материала. На основании этих результатов производят отбор наиболее коррозионностойких сплавов, которые в дальнейшем проверяют на стендах и в действующей аппаратуре непосредственно на производстве.

При динамических испытаниях наиболее полно воспроизводятся производственные условия, где коррозионная среда движется и омывает



образцы. Динамические испытания проводят чаще всего в петле. Петля представляет собой в большинстве случаев замкнутый контур, внутри которого под действием насосов циркулирует коррозионная среда. Перед камерой, в которую помещают образцы, устанавливается нагреватель для подогрева жидкости до рабочей температуры. Необходимость применения насосов, работающих при высоких температурах и давлениях, сильно усложняет конструкцию петли, делает ее громоздкой и дорогостоящей. Поэтому в некоторых случаях приходится ограничиваться испытаниями в статических условиях, а в динамических условиях проверять лишь те материалы, которые прошли предварительные испытания.

Для статических методов коррозионных испытаний обычно применяют установки, где в качестве сосуда для испытаний используется автоклав.

Образцом простейшего автоклава может служить ампула. Это толстостенный сосуд (рис. 6.3) с рабочим объемом до  $10\text{ см}^3$ , на внешней стороне которого имеется резьба для накидной гайки 1. Корпус 3 закрывается пробкой 2 с шаровой поверхностью, входящей в коническое расширение верхней части корпуса, и затягивается накидной гайкой. В данном случае применено уплотнение «шар по конусу». Разнородность сталей (легированная и углеродистая), из которых изготовлены корпус и гайка, предотвращает образование задиров на резьбе при откручивании гайки.

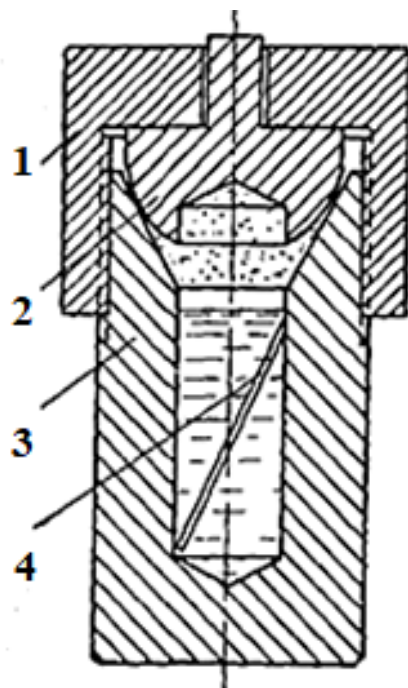


Рис. 6.3. Ампула для коррозионных испытаний при повышенных температурах:

1 – накидная гайка; 2 – пробка; 3 – корпус; 4 – образец

Испытания в ампулах имеют ряд недостатков:

- давление и температуру внутри ампул определяют лишь расчетным путем. При нарушении герметичности изменение режима испытаний сразу может быть и не обнаружено;
- объем коррозионной среды ограничен, что приводит к весьма малым значениям отношения количества воды к поверхности образца;
- в одной ампуле испытывается не более одного образца;
- ненадежность уплотнения приводит иногда к утечке коррозионной среды в виде пара.

Несмотря на эти недостатки, ампулы имеют и целый ряд преимуществ. Прежде всего – это простота конструкции и их изготовления. Небольшие размеры ампул позволяют применять для их нагрева любую лабораторную печь, в которой можно поместить 10–15 ампул одновременно. Кроме того, в ампулах можно исследовать все

продукты коррозии, возникшие в результате коррозии одного и того же образца, и проводить анализ электролита после испытаний.

Для длительных массовых испытаний ампулы вряд ли пригодны, но для быстрой предварительной оценки коррозионных свойств материалов они вполне себя оправдали.

### **Контрольные вопросы**

1. В каких условиях проводят коррозионные испытания при повышенных температурах? В чем преимущества и недостатки испытаний при этих условиях?
2. Опишите конструкцию ампулы для коррозионных испытаний при повышенных температурах в статических условиях.
3. В чем заключается методика обработки экспериментальных данных при проведении коррозионных испытаний при повышенных температурах?

### **6.3. Лабораторная работа №3**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ АБРАЗИВНОЙ ЭРОЗИИ**

**Цель работы:** Освоить способ испытания конструкционных материалов в условиях их абразивной эрозии методом наработки «до отказа». Научиться экспериментально устанавливать недетерминированные показатели надежности конструкционных материалов на основе теоретических положений теории надежности.

### **Методические указания**

Механическое изнашивание – процесс разрушения поверхностей деталей машин упругими и пластическими деформациями металла поверхностных слоев, вызванный внешним механическим воздействием, без существенных физико-механических изменений. Разновидностями механического изнашивания являются: абразивное, изнашивание при пластическом и хрупком разрушении поверхности и абразивная эрозия [97, 98].

Абразивное изнашивание – разрушение при трении скольжения, обусловленное воздействием твердых частиц, вызывающих пластическую деформацию поверхности детали. Взаимодействие твердых частиц с поверхностью металла возможно различным путем: при трении детали по абразивной поверхности, при наличии твердых частиц между скользящими поверхностями и т.п. Обязательным признаком абразивного изнашивания считается разрушение при пластической деформации независимо от того, образуется ли при этом стружка или на поверхности материала появляются

риски. Если в материал с незначительным сдвигом или без него внедрены твердые частицы, то этот вид разрушения также относится к абразивному.

В соответствии с источником и характером абразивных воздействий, испытываемых при работе деталей машин, абразивное изнашивание может быть разделено на следующие подвиды [97]:

- изнашивание царапанием твердыми выступающими частями сопряженной поверхности, которые могут оказаться твердыми структурными составляющими или абразивными частицами, внедрившимися в более мягкую поверхность (в смазке присутствуют твердые частицы);
- изнашивание двух сопряженных поверхностей твердыми частицами, которые передвигаются между ними, периодически закрепляются в одной и царапают другую, или, перекатываясь, выдавливают риску в более мягком материале;
- изнашивание поверхности детали при трении в абразивной среде (процесс измельчения в дробилках).

Изнашивание при пластическом разрушении имеет место, например, в подшипниках, залитых мягким сплавом, где в процессе работы сначала изменяются размеры подшипников, а затем отрываются части металла с поверхности.

Изнашивание при хрупком разрушении наблюдается в тех случаях, когда поверхностный слой одного из трущихся металлов в результате многократной деформации отдельных выступов становится хрупким (зубчатые передачи). Такое изнашивание еще называют контактной усталостью.

Абразивная эрозия – изнашивание под действием быстро движущихся частиц в потоке газа или жидкости. Изнашивание такого рода связано с движением сыпучих абразивных материалов (например, твердых

катализаторов, адсорбентов, инертных носителей) по трубопроводам, в регенераторах, сушилках и других видах технологического оборудования, а также жидкости в насосах, задвижках и других элементах гидравлических машин [90, 91–95, 97–101].

Известен ряд методов для оценки интенсивности изнашивания при абразивной эрозии: взвешивание, профилометрирование, метод радиоактивных изотопов и др.

Метод определения скорости изнашивания путем взвешивания образцов до и после процесса абразивной эрозии наиболее распространен и применяется при условии, что этот процесс носит равномерный характер по изнашиваемой поверхности.

Профилометрирование изношенных поверхностей позволяет выявить локальность, но требует применения дорогих измерительных приборов и инструментов (профилометров, профилографов, микрометров и др.), что не всегда удобно и доступно в инженерной практике.

Метод радиоактивных изотопов не получил практического применения в химической промышленности ввиду его низкой производительности и необходимости применения дорогостоящей измерительной аппаратуры.

В связи с изложенным для установления количественных характеристик надежности при абразивной эрозии в инженерной практике широко применяется метод исследования «до отказа».

Установка для испытаний конструкционных материалов методом наработки «до отказа» в условиях их газоабразивного изнашивания состоит (рис. 6.4) из компрессора 1 для подачи сжатого воздуха, устройства 2 для регулирования расхода воздуха, измерителя расхода 3 и испытательной камеры 4.

В камере 4 установлено с возможностью перемещения в пространстве сопло 5 для создания направленного потока воздуха, напротив которого на поворотном устройстве 6 закреплены 12 пневматических датчиков отказов 7 (конструкция датчиков представлена в лабораторной работе № 1).

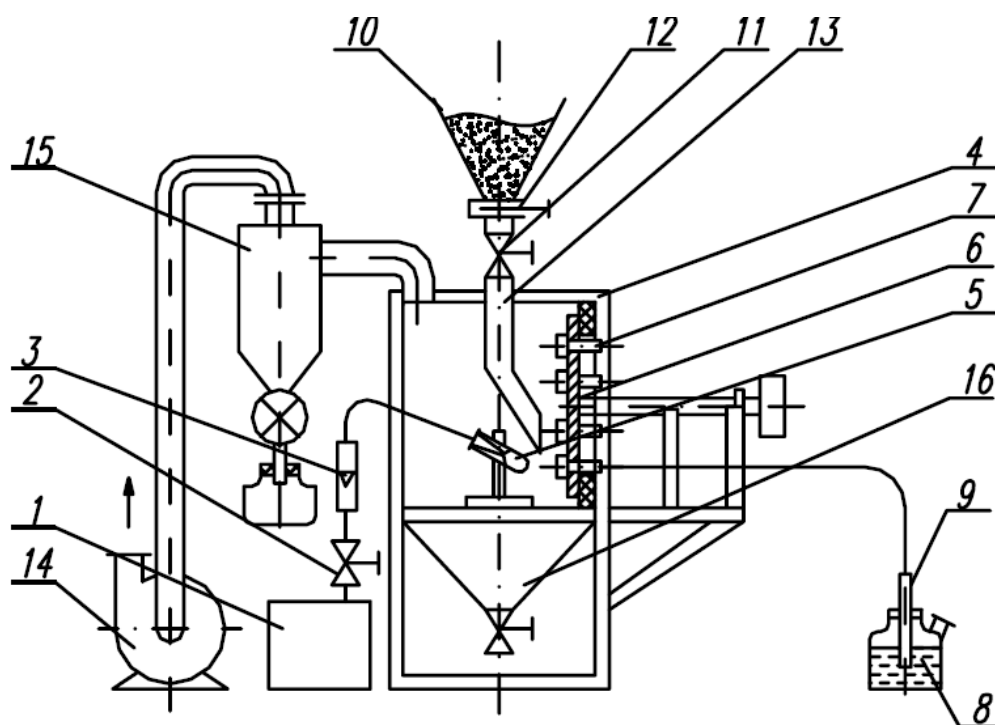


Рис. 6.4. Схема лабораторной установки:

1 – компрессор; 2 – регулятор расхода воздуха; 3 – измеритель расхода воздуха;  
4 – рабочая камера; 5 – сопло; 6 – устройство поворотное; 7 – датчики пневматические;  
8 – сосуд с водой; 9 – трубка стеклянная; 10 – бункер; 11 – регулятор расхода абразива;  
12 – устройство запорное; 13 – трубопровод; 14 – вентилятор вытяжной; 15 – циклон;  
16 – бункер

Пневматический датчик 7 соединяется шлангом с датчиком определения момента потери герметичности, который состоит из сосуда 8 с водой, сообщающегося с атмосферой, и стеклянной трубки 9, погруженной в воду на некоторую глубину (100–200 мм).

Над камерой 4 закреплен бункер 10 подачи абразивного материала (кварцевого песка). На трубопроводе 13 установлены регулятор расхода 11 и запорное устройство 12.

Для очистки и удаления обработанного воздуха предназначены вентилятор 14 и циклон 15, соединенные системой воздухопроводов с камерой 4. Крупная фракция абразивного материала собирается в накопительном бункере 16, установленном под камерой 4, откуда периодически удаляется.

Установка работает следующим образом. Сжатый воздух подается компрессором 1 в сопло 5. Струя воздуха с кварцевым песком ударяет под некоторым углом в поверхность испытуемого образца, закрепленного в датчике отказов 7 (датчики отказов, закрепленные в поворотном устройстве 6, вводятся под воздействие струи последовательно друг за другом по мере обработки образцов до отказа). С течением времени испытуемый образец изнашивается и наступает ситуация отказа, которая выражается в потере герметичности пневматическим датчиком при его «пробое». Этот момент фиксируется изменением уровня жидкости в стеклянной трубке 9.

### **Исходные данные**

Исходными данными является таблица отказов и результаты расчетов из лабораторной работы №1.

### **Порядок выполнения работы**

1. Построить гистограмму частот наработки образцов до отказа с шагом  $\Delta$ :

$$\Delta = (t_{max} - t_{min}) / (1 + 3.32 \lg N).$$

2. Определить коэффициент вариации по формуле:



$$V = \sigma/T$$

и оценить справедливость применения для описания процесса газоабразивного изнашивания конструкционных материалов нормального закона распределения случайной величины. В соответствии с этим законом плотность вероятности распределения наработки до отказа будет иметь вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2} \right],$$

для которой значение коэффициента вариации  $V \leq 0,33$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое механическое изнашивание? Какие разновидности механического изнашивания Вы знаете?
2. Что такое абразивное изнашивание? Что является обязательным признаком абразивного изнашивания?
3. На какие подвиды делится абразивное изнашивание?
4. Что такое абразивная эрозия?
5. Какие методы применяются для оценки интенсивности изнашивания при абразивной эрозии? В чем их преимущества и недостатки?
6. В чем заключается метод испытания конструкционного материала «до отказа»? Перечислите преимущества и недостатки этого метода.
7. Объясните назначение пневматического датчика отказов, его устройство и принцип действия.
8. Объясните устройство и принцип действия лабораторной установки.
9. Опишите методику проведения эксперимента и обработки опытных данных.
10. В чем заключается методика выявления закона распределения наработки на отказ?

## **РАЗДЕЛ 7. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ**

В данном разделе представлен ряд практических задач (с решением) теории надежности технических объектов, направленных на усвоение и закрепление знаний и умений по расчету показателей надежности с использованием математического аппарата теории вероятности и статистики [40, 41, 71, 85, 90–91].

Каждое задание содержит исходные данные, список переменных, которые подлежат расчету, пример решения задачи и таблицу исходных данных по вариантам.

Отчет по практическим задачам должен выполняться в электронном виде с соблюдением ГОСТов, рисунки и таблицы должны нумероваться согласно установленным в университете требованиям.

**Задача №1** На испытание поставлено  $N_0$  изделий. За время  $t$  вышло из строя  $n(t)$  штук изделий. За последующий интервал времени  $\Delta t$  вышло из строя  $n(\Delta t)$  штук изделий. Необходимо вычислить вероятность безотказной работы за время  $t$  и  $(t+\Delta t)$ , частоту отказов и интенсивность отказов на интервале  $\Delta t$ .

**Дано:**

$$N_0=10$$

$$t=1000 \text{ ч}$$

$$\Delta t=100 \text{ ч}$$

$$n(t)=3$$

$$n(\Delta t)=1$$

**Решение:**

Определяем вероятность безотказной работы

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}; \quad P(1000) = \frac{10-3}{10} = 0,7.$$

Вероятность безотказной работы за время  $(t + \Delta t)$ .

$$P(1100) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}; \quad P(1100) = \frac{10-4}{10} = 0,6.$$

Найдем частоту отказов.

$$\alpha(100) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}; \quad \alpha(100) = \frac{1}{10 \cdot 100} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

Найдем интенсивность отказов.

$$\lambda(100) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t N_{\text{ср}}}; \quad \lambda(100) = \frac{1}{100 \cdot \frac{(997+996)}{2}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

**Найти:**

$$P(t) - ?$$

$$P(t+\Delta t) - ?$$

$$\alpha(t) - ?$$

$$\lambda(t) - ?$$

**Ответ:**  $P(t)=0,7$ ;  $P(t+\Delta t)=0,6$ ;  $\alpha(t)=1 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ ;  $\lambda(t)=1 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

Таблица 7.1. Исходные данные к задаче №1

№ варианта	$N_0$	$t$	$\Delta t$	$n(t)$	$n(\Delta t)$
1	10	1000	100	3	1
2	12	1100	200	4	2
3	13	1000	150	5	1
4	14	1500	140	6	2
5	16	1200	120	2	1
6	18	1300	130	3	1
7	16	1200	100	4	2
8	14	1250	200	4	1
9	18	1300	300	5	2
10	20	1400	200	6	3

**Задача №2** В течение времени  $\Delta t$  производилось наблюдение за восстанавливаемым изделием и было зафиксировано  $n(\Delta t)$  отказов. До начала наблюдения изделие проработало в течение времени  $t_1$ , общее время наработки к концу наблюдения составило  $t_2$ . Требуется найти наработку на отказ.

<b>Дано:</b>	<b>Решение:</b>
$t_1=1200$ ч	Найдем наработку изделия за наблюдаемый период.
$t_2=5558$ ч	$t = t_2 - t_1 = 5558 - 1200 = 4358$ ч.
$n(\Delta t)=2$	Принимая $\sum_{i=1}^n t_i = 4358$ ч, находим среднюю наработку на отказ:
<b>Найти:</b>	$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{4358}{2} = 2179,$
$t_{cp} - ?$	где $t_i$ – время исправной работы изделия между $(i-1)$ и $i$ -м отказами; $n$ – число отказов за некоторое время $t$ .
<b>Ответ:</b> Нарботка на отказ равна 2179.	

Таблица 7.2. Исходные данные к задаче №2

№ варианта	$t_1$	$t_2$	$n(\Delta t)$
1	1200	6587	3
2	1300	5698	4
3	1400	4156	5
4	1500	3658	4
5	1600	9653	5
6	1700	5478	6
7	1800	4254	7
8	1900	4589	4
9	2000	6532	6
10	2100	8456	5

**Задача №3** Система состоит из  $N_0$  приборов, имеющих разную надежность. Известно, что каждый из приборов, поработав вне системы в течении времени  $t_1$ , имел  $n_i$  отказов. Для каждого из приборов справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо найти наработку на отказ всей системы.

**Дано:**

$$N=5$$

$$t_1=600 \text{ ч}$$

$$n_1=45$$

$$t_2=600 \text{ ч}$$

$$n_2=2$$

$$t_3=200 \text{ ч}$$

$$n_3=4$$

$$t_4=200 \text{ ч}$$

$$n_4=6$$

$$t_5=200 \text{ ч}$$

$$n_5=2$$

**Найти:**

$$t_{cp} - ?$$

**Решение:**

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{cpi}}{n};$$

$$t_{cp1} = \frac{t_1}{n_1} = \frac{600}{45} = 13,3 \text{ ч};$$

$$t_{cp2} = \frac{600}{2} = 300 \text{ ч};$$

$$t_{cp3} = \frac{200}{4} = 50 \text{ ч};$$

$$t_{cp4} = \frac{200}{6} = 33,3 \text{ ч};$$

$$t_{cp5} = \frac{200}{2} = 100 \text{ ч}.$$

**Ответ:** По имеющимся данным можем определить время только до первого отказа всей системы.

Таблица 7.3. Исходные данные к задаче №3

№ варианта	N	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$
1	5	700	700	800	800	200	37	6	9	8	6
2		800	800	900	700	300	49	7	14	9	16

**Задача №4** Изделие имеет среднюю наработку на отказ ( $t_{cp}$ ) и среднее время восстановления ( $t_B$ ). Необходимо определить коэффициент готовности изделия.

<b>Дано:</b>	<b>Решение:</b>
$t_{cp} = 147$ ч	Находим коэффициент готовности по формуле:
$t_B = 1,7$ ч	$K_r = \frac{t_{cp}}{t_{cp} - t_B} = \frac{1}{1 + \frac{t_B}{t_{cp}}} = \frac{1}{1 + \frac{1,7}{147}} = 0,988.$
<b>Найти:</b>	
$K_r - ?$	
<b>Ответ:</b> Коэффициент готовности изделия равен 0,988.	

Таблица 7.4. Исходные данные к задаче №4

№ варианта	$t_{cp}$	$t_B$
1	150	1,8
2	154	1,6
3	153	2,3
4	162	1,9
5	145	2,2
6	153	3,5
7	178	4,2
8	159	1,9
9	165	2,2
10	168	2,1

**Задача №5** На испытании находилось 1000 однотипных ламп 6Ж4. Число отказавших ламп учитывалось через каждые 1000 часов работы. Требуется определить вероятность безотказной работы, частоту отказов и интенсивность отказов в функции времени, построить графики этих функций. Необходимо также найти среднюю наработку до первого отказа.

Таблица 7.5. Исходные данные к задаче №5

$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–1000	20	13000–14000	40
1000–2000	25	14000–15000	50
2000–3000	35	15000–16000	40
3000–4000	50	16000–17000	50
4000–5000	30	17000–18000	40
5000–6000	50	18000–19000	50
6000–7000	40	19000–20000	35
7000–8000	40	20000–21000	35
8000–9000	50	21000–22000	50
9000–10000	30	22000–23000	35
10000–11000	40	23000–24000	25
11000–12000	40	24000–25000	30
12000–13000	50	25000–26000	20

\*\*\*При решении этой задачи к значению  $n(\Delta t_i)$  необходимо прибавить  $x$ , где  $x$  – это номер варианта (1–20).

<b>Дано:</b>	<b>Решение:</b>
$N_0=1000$	Определим вероятность безотказной работы $P(t)=\frac{N_0-n(t)}{N_0}$ :
$\Delta t=1000$ ч	
<b>Найти:</b>	
$P(t) - ?$	$P(1000)=\frac{1000-20}{1000}=0,98$ ; $P(2000)=\frac{1000-45}{1000}=0,955$ ;
$\alpha(t) - ?$	$P(3000)=\frac{1000-80}{1000}=0,92$ ; $P(4000)=\frac{1000-130}{1000}=0,87$ ;
$\lambda(t) - ?$	$P(5000)=\frac{1000-160}{1000}=0,84$ ; $P(6000)=\frac{1000-210}{1000}=0,79$ ;
$T_{cp} - ?$	$P(7000)=\frac{1000-250}{1000}=0,75$ ; $P(8000)=\frac{1000-290}{1000}=0,71$ ;
	$P(9000)=\frac{1000-340}{1000}=0,66$ ; $P(10000)=\frac{1000-370}{1000}=0,63$ ;
	$P(11000)=\frac{1000-410}{1000}=0,59$ ; $P(12000)=\frac{1000-450}{1000}=0,55$ ;
	$P(13000)=\frac{1000-500}{1000}=0,5$ ; $P(14000)=\frac{1000-540}{1000}=0,46$ ;
	$P(15000)=\frac{1000-590}{1000}=0,41$ ; $P(16000)=\frac{1000-630}{1000}=0,37$ ;
	$P(17000)=\frac{1000-680}{1000}=0,32$ ; $P(18000)=\frac{1000-720}{1000}=0,28$ ;
	$P(19000)=\frac{1000-770}{1000}=0,23$ ; $P(20000)=\frac{1000-805}{1000}=0,19$ ;
	$P(21000)=\frac{1000-840}{1000}=0,16$ ; $P(22000)=\frac{1000-890}{1000}=0,11$ ;
	$P(23000)=\frac{1000-925}{1000}=0,075$ ; $P(24000)=\frac{1000-950}{1000}=0,05$
	$P(25000)=\frac{1000-980}{1000}=0,02$ ; $P(26000)=\frac{1000-1000}{1000}=0$ .
	Найдем частоту отказов по формуле $\alpha(t)=\frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}$ :
	$\alpha(500)=\frac{20}{1000 \cdot 1000}=0,2 \cdot 10^{-4}$ ; $\alpha(1500)=\frac{25}{1000 \cdot 1000}=0,25 \cdot 10^{-4}$ ;
	$\alpha(2500)=\frac{35}{1000 \cdot 1000}=0,35 \cdot 10^{-4}$ ; $\alpha(3500)=\frac{50}{1000 \cdot 1000}=0,5 \cdot 10^{-4}$ ;
	$\alpha(4500)=\frac{30}{1000 \cdot 1000}=0,3 \cdot 10^{-4}$ ; $\alpha(5500)=\frac{50}{1000 \cdot 1000}=0,5 \cdot 10^{-4}$ ;
	$\alpha(6500)=\frac{40}{1000 \cdot 1000}=0,4 \cdot 10^{-4}$ ; $\alpha(7500)=\frac{40}{1000 \cdot 1000}=0,4 \cdot 10^{-4}$ ;
	$\alpha(8500)=\frac{50}{1000 \cdot 1000}=0,5 \cdot 10^{-4}$ ; $\alpha(9500)=\frac{30}{1000 \cdot 1000}=0,3 \cdot 10^{-4}$ ;



$$\alpha(10500) = \frac{40}{1000 \cdot 1000} = 0,4 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha(11500) = \frac{40}{1000 \cdot 1000} = 0,4 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha(12500) = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 0,5 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha(13500) = \frac{40}{1000 \cdot 1000} = 0,4 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha(14500) = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 0,5 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha(15500) = \frac{40}{1000 \cdot 1000} = 0,4 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha(16500) = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 0,5 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha(17500) = \frac{40}{1000 \cdot 1000} = 0,4 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha(18500) = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 0,5 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha(19500) = \frac{35}{1000 \cdot 1000} = 0,35 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha(20500) = \frac{35}{1000 \cdot 1000} = 0,35 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha(21500) = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 0,5 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha(22500) = \frac{35}{1000 \cdot 1000} = 0,35 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha(23500) = \frac{25}{1000 \cdot 1000} = 0,25 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha(24500) = \frac{30}{1000 \cdot 1000} = 0,3 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha(25500) = \frac{20}{1000 \cdot 1000} = 0,2 \cdot 10^{-4}.$$

Найдем интенсивность отказов по формуле  $\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N_{cp}}$ :

$$\lambda(500) = \frac{20}{1000 \cdot \frac{(1000+980)}{2}} = 0,20 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(1500) = \frac{25}{1000 \cdot \frac{(980+955)}{2}} = 0,26 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(2500) = \frac{35}{1000 \cdot \frac{(955+920)}{2}} = 0,37 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(3500) = \frac{50}{1000 \cdot \frac{(920+870)}{2}} = 0,56 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(4500) = \frac{30}{1000 \cdot \frac{(870+840)}{2}} = 0,35 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(5500) = \frac{50}{1000 \cdot \frac{(840+790)}{2}} = 0,61 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(6500) = \frac{40}{1000 \cdot \frac{(790+750)}{2}} = 0,52 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(7500) = \frac{40}{1000 \cdot \frac{(750+710)}{2}} = 0,55 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(8500) = \frac{50}{1000 \cdot \frac{(710+660)}{2}} = 0,73 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(9500) = \frac{30}{1000 \cdot \frac{(660+630)}{2}} = 0,46 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(10500) = \frac{40}{1000 \cdot \frac{(630+600)}{2}} = 0,65 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(11500) = \frac{40}{1000 \cdot \frac{(600+560)}{2}} = 0,69 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(12500) = \frac{50}{1000 \cdot \frac{(560+510)}{2}} = 0,93 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(13500) = \frac{40}{1000 \cdot \frac{(510+470)}{2}} = 0,82 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(14500) = \frac{50}{1000 \cdot \frac{(470+420)}{2}} = 1,12 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(15500) = \frac{40}{1000 \cdot \frac{(420+380)}{2}} = 1 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(16500) = \frac{50}{1000 \cdot \frac{(380+330)}{2}} = 1,41 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(17500) = \frac{40}{1000 \cdot \frac{(330+290)}{2}} = 1,29 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(18500) = \frac{50}{1000 \cdot \frac{(290+240)}{2}} = 1,88 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(19500) = \frac{35}{1000 \cdot \frac{(240+205)}{2}} = 1,57 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(20500) = \frac{35}{1000 \cdot \frac{(205+170)}{2}} = 1,87 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(21500) = \frac{50}{1000 \cdot \frac{(170+120)}{2}} = 3,45 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(22500) = \frac{35}{1000 \cdot \frac{(120+85)}{2}} = 3,41 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(23500) = \frac{25}{1000 \cdot \frac{(85+60)}{2}} = 3,45 \cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(24500) = \frac{30}{1000 \cdot \frac{(60+30)}{2}} = 6,67 \cdot 10^{-4}; \quad \lambda(25500) = \frac{20}{1000 \cdot \frac{(30+20)}{2}} = 8 \cdot 10^{-4}.$$

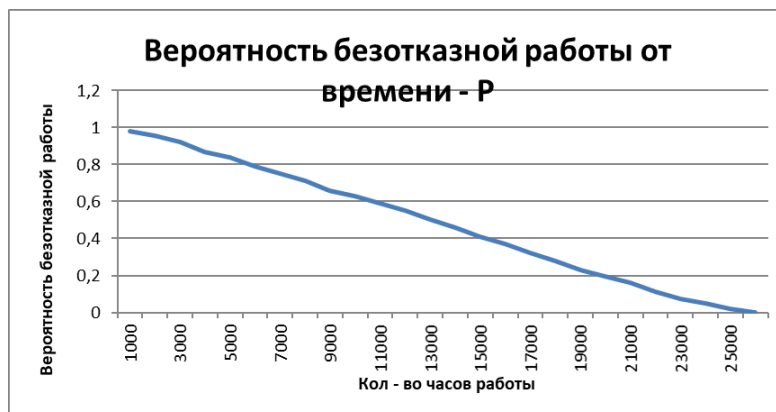


Рис. 7.1. График зависимости вероятности безотказной работы от времени



Рис. 7.2. График зависимости частоты отказов от времени



Рис. 7.3. График зависимости интенсивности отказов от времени

Найдем среднюю наработку до первого отказа:

$$m = \frac{tk}{\Delta t} = \frac{26000}{1000} = 26; \quad N_0 = 1000; \quad T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i \cdot t_{cp i}}{N_0} = \frac{12925000}{1000} = 12925.$$

**Ответ:** Вероятность безотказной работы с увеличением количества часов работы падает линейно на всех промежутках времени.

Частота отказов в начале испытания составила  $0,2 \times 10^{-4}$ . Далее в процессе испытаний частота отказов выросла и держалась в пределах  $0,35 \times 10^{-4} - 0,5 \times 10^{-4}$ . В конце испытания частота отказов понизилась до  $0,2 \times 10^{-4}$ .

Интенсивность отказов в процессе испытания увеличивалась экспоненциально незначительно. После 20500 часов работы интенсивность отказов резко увеличилась экспоненциально.

**Задача №6** В результате наблюдений за 45 образцами радиоэлектронного оборудования получены данные до первого отказа всех 45 образцов.

Определить:  $P(t)$ ;  $\alpha(t)$ ;  $\lambda(t)$  в функции времени, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа ( $T_{cp}$ ).

Таблица 7.6. Исходные данные к задаче №6

$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–5	1	40–45	0
5–10	5	45–50	1
10–15	8	50–55	0
15–20	2	55–60	0
20–25	5	60–65	3
25–30	6	65–70	3
30–35	4	70–75	3
35–40	3	75–80	1

\*\*\*При решении этой задачи к значению  $n(\Delta t_i)$  необходимо прибавить  $x$ , где  $x$  – это номер варианта (1–5).

<b>Дано:</b>	<b>Решение:</b>
$N_0 = 45$	Определим вероятность безотказной работы по формуле
$\Delta t = 5 \text{ ч}$	$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} :$
<b>Найти:</b>	$P(5) = \frac{45-1}{45} = 0,98; \quad P(10) = \frac{45-6}{45} = 0,87;$
$P(t) - ?$	$P(15) = \frac{45-14}{45} = 0,69; \quad P(20) = \frac{45-16}{45} = 0,64;$
$\alpha(t) - ?$	$P(25) = \frac{45-21}{45} = 0,53; \quad P(30) = \frac{45-27}{45} = 0,4;$
$\lambda(t) - ?$	$P(35) = \frac{45-31}{45} = 0,31; \quad P(40) = \frac{45-34}{45} = 0,24;$
$T_{cp} - ?$	$P(45) = \frac{45-34}{45} = 0,24; \quad P(50) = \frac{45-35}{45} = 0,22;$
	$P(55) = \frac{45-35}{45} = 0,22; \quad P(60) = \frac{45-35}{45} = 0,22;$

$$P(65) = \frac{45-38}{45} = 0,16; \quad P(70) = \frac{45-41}{45} = 0,09;$$

$$P(75) = \frac{45-44}{45} = 0,02; \quad P(80) = \frac{45-45}{45} = 0.$$

Найдем частоту отказов по формуле  $\alpha(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}$ :

$$\alpha(2,5) = \frac{1}{45 \cdot 5} = 0,44 \cdot 10^{-2}; \quad \alpha(7,5) = \frac{5}{45 \cdot 5} = 2,22 \cdot 10^{-2}; \quad \alpha(12,5) = \frac{8}{45 \cdot 5} = 3,55 \cdot 10^{-2};$$

$$\alpha(17,5) = \frac{2}{45 \cdot 5} = 0,88 \cdot 10^{-2}; \quad \alpha(22,5) = \frac{5}{45 \cdot 5} = 2,22 \cdot 10^{-2}; \quad \alpha(27,5) = \frac{6}{45 \cdot 5} = 2,66 \cdot 10^{-2};$$

$$\alpha(32,5) = \frac{4}{45 \cdot 5} = 1,77 \cdot 10^{-2}; \quad \alpha(37,5) = \frac{3}{45 \cdot 5} = 1,33 \cdot 10^{-2}; \quad \alpha(42,5) = 0;$$

$$\alpha(47,5) = \frac{1}{45 \cdot 5} = 0,44 \cdot 10^{-2}; \quad \alpha(52,5) = 0; \quad \alpha(57,5) = 0; \quad \alpha(62,5) = \frac{3}{45 \cdot 5} = 1,33 \cdot 10^{-2};$$

$$\alpha(67,5) = \frac{3}{45 \cdot 5} = 1,33 \cdot 10^{-2}; \quad \alpha(72,5) = \frac{3}{45 \cdot 5} = 1,33 \cdot 10^{-2}; \quad \alpha(77,5) = \frac{1}{45 \cdot 5} = 0,44 \cdot 10^{-2}.$$

Найдем интенсивность отказов по формуле  $\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N_{cp}}$ :

$$\lambda(2,5) = \frac{1}{5 \cdot \frac{(45+44)}{2}} = 0,45 \cdot 10^{-2}; \quad \lambda(7,5) = \frac{5}{5 \cdot \frac{(44+39)}{2}} = 2,40 \cdot 10^{-3};$$

$$\lambda(12,5) = \frac{8}{5 \cdot \frac{(39+31)}{2}} = 4,57 \cdot 10^{-3}; \quad \lambda(17,5) = \frac{2}{5 \cdot \frac{(31+29)}{2}} = 1,33 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda(22,5) = \frac{5}{5 \cdot \frac{(29+24)}{2}} = 3,77 \cdot 10^{-2}; \quad \lambda(27,5) = \frac{6}{5 \cdot \frac{(24+18)}{2}} = 5,71 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda(32,5) = \frac{4}{5 \cdot \frac{(18+14)}{2}} = 5 \cdot 10^{-2}; \quad \lambda(37,5) = \frac{3}{5 \cdot \frac{(14+11)}{2}} = 4,8 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda(42,5) = 0; \quad \lambda(47,5) = \frac{1}{5 \cdot \frac{(11+10)}{2}} = 1,90 \cdot 10^{-2}; \quad \lambda(52,5) = 0; \quad \lambda(57,5) = 0;$$

$$\lambda(62,5) = \frac{3}{5 \cdot \frac{(10+7)}{2}} = 7,05 \cdot 10^{-2}; \quad \lambda(67,5) = \frac{3}{5 \cdot \frac{(7+4)}{2}} = 10,9 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda(72,5) = \frac{3}{5 \cdot \frac{(4+1)}{2}} = 24 \cdot 10^{-2}; \quad \lambda(77,5) = \frac{1}{5 \cdot \frac{(1+0)}{2}} = 40 \cdot 10^{-2}.$$

Находим среднюю наработку до первого отказа. Учитывая, что в данном случае:  $m = t_k / \Delta t = 80 / 5 = 16$ ;  $N_0 = 45$ ; имеем:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_{cpi}}{N_0} = \frac{1 \times 2,5 + 5 \times 7,5 + 8 \times 12,5 + 2 \times 17,5 + \dots + 3 \times 62,5 + 3 \times 72,5 + 77,5}{45} = 31,72.$$

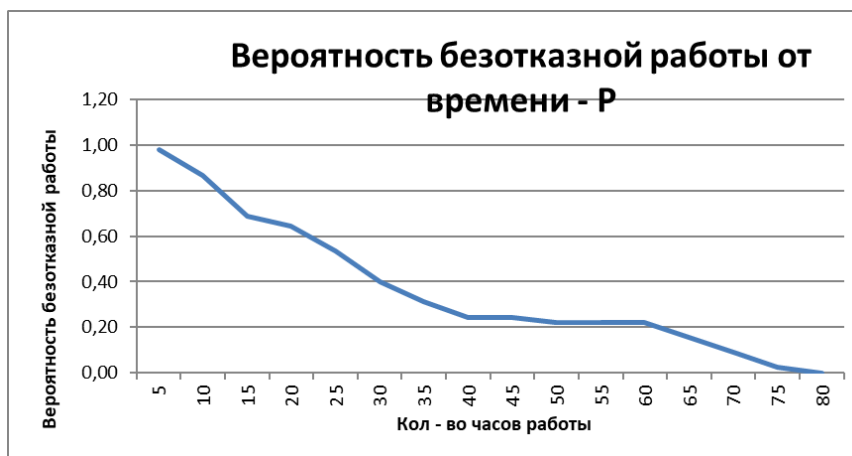


Рис. 7.4. График зависимости вероятности безотказной работы от времени



Рис. 7.5. График зависимости частоты отказов от времени



Рис. 7.6. График зависимости интенсивности отказов от времени

**Ответ:** Вероятность безотказной работы на всем процессе наблюдения уменьшается, а в промежутке наблюдения от 40 до 60 часов работы остановилась на уровне 0,22. В промежутке времени от 2,5 до 12,5 часов работы частота отказов увеличивалась и достигла  $36 \times 10^{-3}$  ч. В промежутке от 12,5 до 17,5 часов частота отказов уменьшилась до  $9 \times 10^{-3}$  ч. В промежутке от 17,5 до 27,5 часов частота отказов увеличилась до  $27 \times 10^{-3}$  ч. В промежутке от 27,5 до 42,5 часов падает до нуля. В промежутке от 42,5 до 57,5 часов частота отказов не превышает  $5 \times 10^{-3}$  ч и после 47,5 часов работы падает до нуля. В промежутке от 57,5 до 62,5 часов работы частота отказов увеличилась до  $13 \times 10^{-3}$  ч и держалась до 72,5 часов работы наблюдений. В конце испытания частота отказов упала до  $4 \times 10^{-3}$  ч. В процессе наблюдения от 2,5 до 57,5 часов интенсивность отказов была в пределах от 0 до  $5,71 \times 10^{-2}$  ч. После 57,5 часов работы наблюдений интенсивность отказов резко увеличилась и в конце наблюдения достигла 0,4 ч.

**Задача №7** В результате наблюдений за 45 образцами радиоэлектронного оборудования, которые прошли предварительную 80-часовую приработку, получены данные до первого отказа всех 45 образцов. Требуется определить:  $P(t)$ ;  $\alpha(t)$ ;  $\lambda(t)$  в функции времени, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа ( $T_{cp}$ ).

Таблица 7.7. Исходные данные к задаче №7

$\Delta t_i$ , ч		$n(\Delta t_i)$		
0 – 10		19		
10 – 20		13		
20 – 30		8		
30 – 40		3		
40 – 50		0		
50 – 60		1		
60 – 70		1		
$n(\Delta t_i)$				
Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
19	18	17	15	20
12	12	15	14	11
9	9	6	11	9
2	4	4	2	2
1	1	1	1	1
1	0	1	1	1
1	1	1	1	0

Дано:	Решение:
$\Delta t_i$ , ч	$P(t) = \frac{(N_0 - n(t))}{N_0}$
$n(\Delta t_i)$	
Найти:	Вычислим $P(t)$ по формуле :
$P(t) - ?$	$P(10) = \frac{45-19}{45} = 0,58$ ; $P(20) = \frac{45-32}{45} = 0,29$ ;
$\alpha(t) - ?$	$P(30) = \frac{45-40}{45} = 0,11$ ; $P(40) = \frac{45-43}{45} = 0,04$ ;
$\lambda(t) - ?$	$P(50) = \frac{45-43}{45} = 0,04$ ; $P(60) = \frac{45-44}{45} = 0,02$ ;
$T_{cp} - ?$	$P(70) = \frac{45-45}{45} = 0$ .



Рассчитываем частоту отказов по формуле  $\alpha(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}$  :

$$\alpha(5) = \frac{19}{45 \times 10} = 0,042; \alpha(10) = \frac{13}{45 \times 10} = 0,029;$$

$$\alpha(25) = \frac{8}{45 \times 10} = 0,018; \alpha(35) = \frac{3}{45 \times 10} = 0,007;$$

$$\alpha(45) = \frac{0}{45 \times 10} = 0; \alpha(55) = \frac{1}{45 \times 10} = 0,002;$$

$$\alpha(65) = \frac{1}{45 \times 10} = 0,002;$$

Рассчитываем интенсивность отказов по формуле  $\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t}$  :

$$\lambda(5) = \frac{19}{10 \times \left(\frac{45+26}{2}\right)} = 0,0535; \lambda(15) = \frac{13}{10 \times \left(\frac{26+13}{2}\right)} = 0,0667;$$

$$\lambda(25) = \frac{8}{10 \times \left(\frac{13+5}{2}\right)} = 0,0889; \lambda(35) = \frac{3}{10 \times \left(\frac{5+2}{2}\right)} = 0,0857;$$

$$\lambda(45) = \frac{0}{10 \times \left(\frac{2+2}{2}\right)} = 0; \lambda(55) = \frac{1}{10 \times \left(\frac{2+1}{2}\right)} = 0,0667;$$

$$\lambda(65) = \frac{1}{10 \times \left(\frac{1+0}{2}\right)} = 0,2.$$

Находим среднюю наработку до первого отказа. Учитывая, что в данном случае:  $m=t_k/\Delta t=70/10=7$ ;  $N_0=45$ ; имеем:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_{cpi}}{N_0} = \frac{19 \times 5 + 13 \times 15 + 8 \times 25 + 3 \times 35 + 0 \times 45 + 1 \times 55 + 1 \times 65}{45} = 15,89.$$

Строим графики функций.

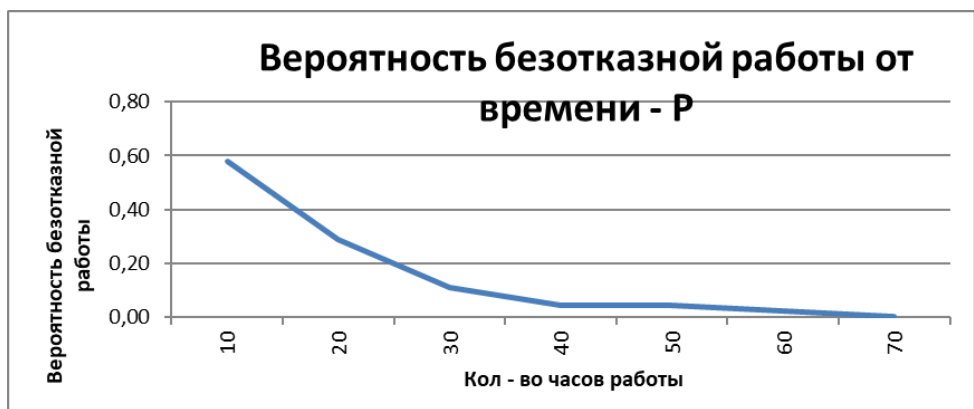


Рис. 7.7. График зависимости вероятности безотказной работы от времени

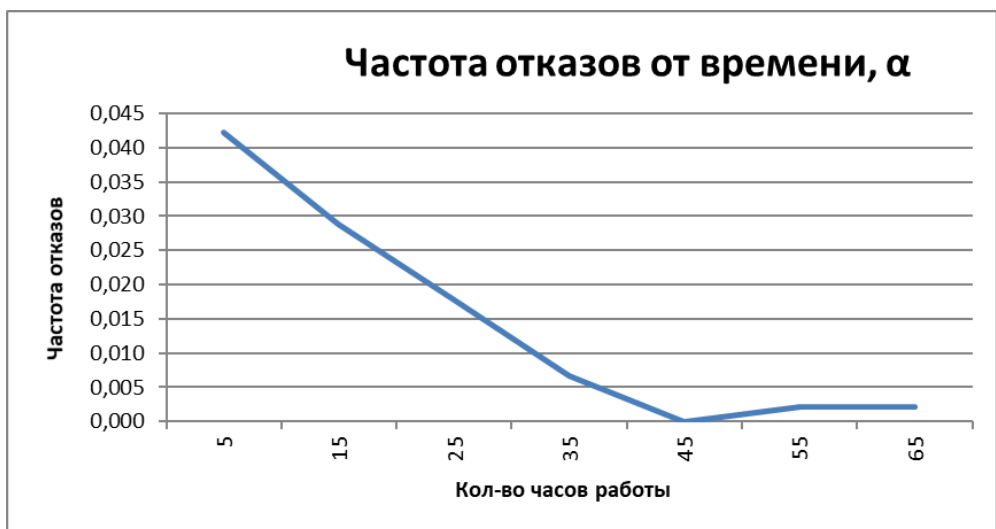


Рис. 7.8. График зависимости частоты отказов от времени

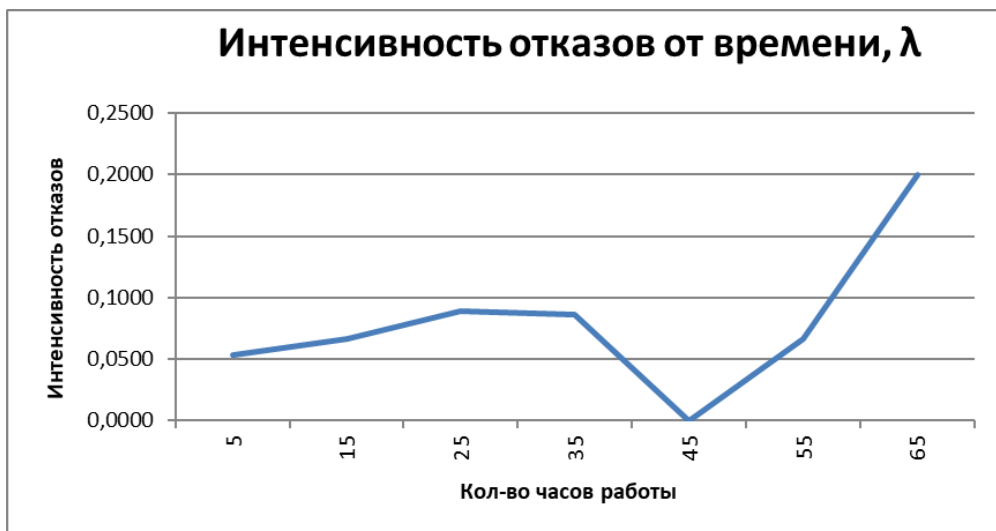


Рис. 7.9. График зависимости интенсивности отказов от времени

**Ответ:** Вероятность безотказной работы радиоэлектронного оборудования падала на всем процессе наблюдений и изменялась от 0,58 до 0.

Частота отказов после 5 часов работы радиоэлектронного оборудования составила  $4,2 \times 10^{-2}$  ч. Далее частота отказов падала и после 45 часов работы частота достигла нуля. Далее до конца наблюдения частота отказов держалась на отметке  $2 \times 10^{-3}$  ч.

Интенсивность отказов в промежутке времени до 25 часов работы радиоэлектронного оборудования увеличивалась от  $53,5 \times 10^{-3}$  ч до  $88,9 \times 10^{-3}$  ч. Далее интенсивность отказов падала и на отметке 45 часов достигла нуля. Потом интенсивность резко увеличилась и в конце наблюдения составила 0,2 ч.

**Задача №8** На испытание поставлено  $N=1000$  элементов. Число отказов фиксировалось в каждом интервале времени испытаний  $\Delta t=500$  ч. Требуется определить вероятность безотказной работы, частоту отказов и интенсивность отказов в функции времени, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа элементов.

Таблица 7.8. Исходные данные к задаче №8

$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–500	145	4500–5000	37
500–1000	86	5000–5500	33
1000–1500	77	5500–6000	35
1500–2000	69	6000–6500	60
2000–2500	62	6500–7000	75
2500–3000	56	7000–7500	62
3000–3500	51	7500–8000	42
3500–4000	45	8000–8500	16
4000–4500	41		

\*\*\*При решении этой задачи к значению  $n(\Delta t_i)$  необходимо прибавить  $x$ , где  $x$  – это номер варианта (1–10).

<b>Дано:</b>	<b>Решение:</b>
$\Delta t_i, \text{ч}$	
$n(\Delta t_i)$	$P(t) = \frac{(N_0 - n(t))}{N_0}$
<b>Найти:</b>	Вычислим $P(t)$ по формуле :
$P(t) - ?$	$P(500) = \frac{1000 - 145}{1000} = 0.855; P(1000) = \frac{1000 - 231}{1000} = 0.769;$
$\alpha(t) - ?$	$P(1500) = \frac{1000 - 308}{1000} = 0.692; P(2000) = \frac{1000 - 377}{1000} = 0.623;$
$\lambda(t) - ?$	$P(2500) = \frac{1000 - 439}{1000} = 0.561; P(3000) = \frac{1000 - 495}{1000} = 0.505;$
$T_{\text{ср}} - ?$	$P(3500) = \frac{1000 - 546}{1000} = 0.454; P(4000) = \frac{1000 - 591}{1000} = 0.409;$
	$P(4500) = \frac{1000 - 632}{1000} = 0.368; P(5000) = \frac{1000 - 669}{1000} = 0.331;$
	$P(5500) = \frac{1000 - 702}{1000} = 0.298; P(6000) = \frac{1000 - 737}{1000} = 0.263;$

$$\begin{aligned}
 P(6500) &= \frac{1000 - 797}{1000} = 0.203; \quad P(7000) = \frac{1000 - 872}{1000} = 0.128; \\
 P(7500) &= \frac{1000 - 934}{1000} = 0.066; \quad P(8000) = \frac{1000 - 976}{1000} = 0.024; \\
 P(8500) &= \frac{1000 - 992}{1000} = 0.008.
 \end{aligned}$$

Найдем частоту отказов по формуле  $\alpha(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}$ :

$$\begin{aligned}
 \alpha(250) &= \frac{145}{1000 \cdot 500} = 0,29 \cdot 10^{-3}; \quad \alpha(750) = \frac{86}{1000 \cdot 500} = 0,17 \cdot 10^{-3}; \\
 \alpha(1250) &= \frac{77}{1000 \cdot 500} = 0,15 \cdot 10^{-3}; \quad \alpha(1750) = \frac{69}{1000 \cdot 500} = 0,14 \cdot 10^{-3}; \\
 \alpha(2250) &= \frac{62}{1000 \cdot 500} = 0,12 \cdot 10^{-3}; \quad \alpha(2750) = \frac{56}{1000 \cdot 500} = 0,11 \cdot 10^{-3}; \\
 \alpha(3250) &= \frac{51}{1000 \cdot 500} = 0,10 \cdot 10^{-3}; \quad \alpha(3750) = \frac{45}{1000 \cdot 500} = 0,09 \cdot 10^{-3}; \\
 \alpha(4250) &= \frac{41}{1000 \cdot 500} = 0,08 \cdot 10^{-3}; \quad \alpha(4750) = \frac{37}{1000 \cdot 500} = 0,07 \cdot 10^{-3}; \\
 \alpha(5250) &= \frac{33}{1000 \cdot 500} = 0,06 \cdot 10^{-3}; \quad \alpha(5750) = \frac{35}{1000 \cdot 500} = 0,07 \cdot 10^{-3}; \\
 \alpha(6250) &= \frac{60}{1000 \cdot 500} = 0,12 \cdot 10^{-3}; \quad \alpha(6750) = \frac{75}{1000 \cdot 500} = 0,15 \cdot 10^{-3}; \\
 \alpha(7250) &= \frac{62}{1000 \cdot 500} = 0,12 \cdot 10^{-3}; \quad \alpha(7750) = \frac{42}{1000 \cdot 500} = 0,08 \cdot 10^{-3}; \\
 \alpha(8250) &= \frac{16}{1000 \cdot 500} = 0,03 \cdot 10^{-3}.
 \end{aligned}$$

Найдем интенсивность отказов по формуле  $\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N_{cp}}$ :

$$\begin{aligned}
 \lambda(250) &= \frac{145}{500 * (\frac{1000 + 855}{2})} = 3.1 * 10^{-4}; \quad \lambda(750) = \frac{86}{500 * (\frac{855 + 769}{2})} = 2.1 * 10^{-4}; \\
 \lambda(1250) &= \frac{77}{500 * (\frac{769 + 692}{2})} = 2.1 * 10^{-4}; \quad \lambda(1750) = \frac{69}{500 * (\frac{692 + 623}{2})} = 2.1 * 10^{-4}; \\
 \lambda(2250) &= \frac{62}{500 * (\frac{623 + 561}{2})} = 2.1 * 10^{-4}; \quad \lambda(2750) = \frac{56}{500 * (\frac{561 + 505}{2})} = 2.1 * 10^{-4}; \\
 \lambda(3250) &= \frac{51}{500 * (\frac{505 + 454}{2})} = 2.1 * 10^{-4}; \quad \lambda(3750) = \frac{45}{500 * (\frac{454 + 409}{2})} = 2.1 * 10^{-4};
 \end{aligned}$$

$$\lambda(4250) = \frac{41}{500 * (\frac{409 + 368}{2})} = 2.1 * 10^{-4}; \lambda(4750) = \frac{37}{500 * (\frac{368 + 331}{2})} = 2.1 * 10^{-4};$$

$$\lambda(5250) = \frac{33}{500 * (\frac{331 + 298}{2})} = 2.1 * 10^{-4}; \lambda(5750) = \frac{35}{500 * (\frac{298 + 263}{2})} = 2.5 * 10^{-4};$$

$$\lambda(6250) = \frac{60}{500 * (\frac{263 + 203}{2})} = 5.2 * 10^{-4}; \lambda(6750) = \frac{75}{500 * (\frac{203 + 128}{2})} = 9.1 * 10^{-4};$$

$$\lambda(7250) = \frac{62}{500 * (\frac{128 + 66}{2})} = 12.8 * 10^{-4}; \lambda(7750) = \frac{42}{500 * (\frac{66 + 24}{2})} = 18.7 * 10^{-4};$$

$$\lambda(8250) = \frac{16}{500 * (\frac{24 + 8}{2})} = 20 * 10^{-4};$$

Находим среднюю наработку до первого отказа. Учитывая, что в данном случае:  $m = t_k / \Delta t = 8500 / 500 = 17$ ;  $N_0 = 992$ ; имеем:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_{cpi}}{N_0} = \frac{145 \times 250 + 86 \times 750 + 77 \times 1250 + \dots + 62 \times 7250 + 24 \times 7750 + 16 \times 8250}{992} = 3486,391.$$

Строим графики функций.



Рис. 7.10. График зависимости вероятности безотказной работы от времени



Рис. 7.11. График зависимости частоты отказов от времени



Рис. 7.12. График зависимости интенсивности отказов от времени

**Ответ:** Вероятность безотказной работы после 500 часов испытаний составила 0,855 и падала на всем процессе испытаний до нуля.

Частота отказов после 250 часов работы составила  $2,9 \times 10^{-4}$  ч и падала до 5750 часов испытаний и достигла  $0,7 \times 10^{-4}$  ч. Далее до 6750 часов работы частота отказов увеличивалась до  $1,5 \times 10^{-4}$  ч. Далее до конца наблюдений частота падала и в конце наблюдений она составила  $0,3 \times 10^{-4}$  ч.

В процессе наблюдений от 250 до 5750 часов интенсивность отказов держалась на уровне  $2,1 \times 10^{-4}$  ч. Далее до конца наблюдений интенсивность увеличивалась и в конце составила  $20 \times 10^{-4}$  ч.



**Задача №9** Имеются статистические данные об отказах трех групп одинаковых изделий. В каждой группе было по 100 изделий, и их испытания проводились по 1 группе 550 ч, по 2 группе 400 ч и по 3 группе 200 ч. Необходимо вычислить количественные характеристики  $P(t)$ ,  $\alpha(t)$ ,  $\lambda(t)$  и построить графики этих функций.

Табл. 7.9. Исходные данные к задаче №9

$\Delta t_i$ , ч	Количество отказов $n(\Delta t_i)$ по группам изделий			$\Sigma n(\Delta t_i)$
	1 группа	2 группа	3 группа	
0–25	4	6	5	15
25–50	8	9	8	25
50–75	6	5	7	18
75–100	3	4	5	12
100–150	5	5	6	16
150–200	4	3	3	10
200–250	1	3	-	4
250–300	2	2	-	4
300–400	3	4	-	7
400–550	5	-	-	5

\*\*\*Исходные данные к решению этой задачи выдает преподаватель на практическом занятии.

<b>Дано:</b>	<b>Решение:</b>
$\Delta t_i$ , ч	<u>Вычислим количественные характеристики для 1 группы.</u>
$n(\Delta t_i)$ по группам изделий	$P(t) = \frac{(N_0 - n(t))}{N_0}$
$\Sigma n(\Delta t_i)$	Вычислим $P(t)$ по формуле :
<b>Найти:</b>	$P(25) = \frac{100 - 4}{100} = 0.96; P(50) = \frac{100 - 12}{100} = 0.88; P(75) = \frac{100 - 18}{100} = 0.82;$
$P(t) - ?$	$P(100) = \frac{100 - 21}{100} = 0.79; P(150) = \frac{100 - 26}{100} = 0.74;$
$\alpha(t) - ?$	$P(200) = \frac{100 - 30}{100} = 0.7; P(250) = \frac{100 - 31}{100} = 0.69;$
$\lambda(t) - ?$	$P(300) = \frac{100 - 33}{100} = 0.67; P(400) = \frac{100 - 36}{100} = 0.64;$
	$P(550) = \frac{100 - 41}{100} = 0.59.$

$$\alpha(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}$$

Рассчитываем частоту отказов по формуле

$$\begin{aligned}\alpha(12.5) &= \frac{4}{100 * 25} = 16 * 10^{-4}; \alpha(37.5) = \frac{8}{100 * 25} = 32 * 10^{-4}; \alpha(62.5) = \frac{6}{100 * 25} = 24 * 10^{-4}; \\ \alpha(87.5) &= \frac{3}{100 * 25} = 12 * 10^{-4}; \alpha(125) = \frac{5}{100 * 50} = 10 * 10^{-4}; \alpha(175) = \frac{4}{100 * 50} = 8 * 10^{-4}; \\ \alpha(225) &= \frac{1}{100 * 50} = 2 * 10^{-4}; \alpha(275) = \frac{2}{100 * 50} = 4 * 10^{-4}; \\ \alpha(350) &= \frac{3}{100 * 100} = 3 * 10^{-4}; \alpha(475) = \frac{5}{100 * 150} = 3.3 * 10^{-4};\end{aligned}$$

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t}$$

Рассчитываем интенсивность отказов по формуле

$$\begin{aligned}\lambda(12.5) &= \frac{4}{25 * (\frac{100 + 96}{2})} = 16.3 * 10^{-4}; \lambda(37.5) = \frac{8}{25 * (\frac{96 + 88}{2})} = 34.8 * 10^{-4}; \\ \lambda(62.5) &= \frac{6}{25 * (\frac{88 + 82}{2})} = 28.2 * 10^{-4}; \lambda(87.5) = \frac{3}{25 * (\frac{82 + 79}{2})} = 14.9 * 10^{-4}; \\ \lambda(125) &= \frac{5}{50 * (\frac{79 + 74}{2})} = 13.1 * 10^{-4}; \lambda(175) = \frac{4}{50 * (\frac{74 + 70}{2})} = 11.1 * 10^{-4}; \\ \lambda(225) &= \frac{1}{50 * (\frac{70 + 69}{2})} = 2.9 * 10^{-4}; \lambda(275) = \frac{2}{50 * (\frac{69 + 67}{2})} = 5.9 * 10^{-4}; \\ \lambda(350) &= \frac{3}{100 * (\frac{67 + 64}{2})} = 4.6 * 10^{-4}; \lambda(475) = \frac{5}{150 * (\frac{64 + 59}{2})} = 5.4 * 10^{-4};\end{aligned}$$

Вычислим количественные характеристики для 2 группы.

$$P(t) = \frac{(N_0 - n(t))}{N_0}$$

Вычислим P(t) по формуле

$$\begin{aligned}P(25) &= \frac{100 - 6}{100} = 0.94; P(50) = \frac{100 - 15}{100} = 0.85; P(75) = \frac{100 - 20}{100} = 0.8; \\ P(100) &= \frac{100 - 24}{100} = 0.76; P(150) = \frac{100 - 29}{100} = 0.71; P(200) = \frac{100 - 32}{100} = 0.68;\end{aligned}$$

$$P(250) = \frac{100 - 35}{100} = 0.65; P(300) = \frac{100 - 37}{100} = 0.63; P(400) = \frac{100 - 41}{100} = 0.59;$$

Рассчитываем частоту отказов по формуле  $\alpha(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}$  :

$$\alpha(12.5) = \frac{6}{100 * 25} = 24 * 10^{-4}; \alpha(37.5) = \frac{9}{100 * 25} = 36 * 10^{-4}; \alpha(62.5) = \frac{5}{100 * 25} = 20 * 10^{-4};$$

$$\alpha(87.5) = \frac{4}{100 * 25} = 16 * 10^{-4}; \alpha(125) = \frac{5}{100 * 50} = 10 * 10^{-4}; \alpha(175) = \frac{3}{100 * 50} = 6 * 10^{-4};$$

$$\alpha(225) = \frac{3}{100 * 50} = 6 * 10^{-4}; \alpha(275) = \frac{2}{100 * 50} = 4 * 10^{-4};$$

$$\alpha(350) = \frac{4}{100 * 100} = 4 * 10^{-4};$$

Рассчитываем интенсивность отказов по формуле  $\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t}$  :

$$\lambda(12.5) = \frac{6}{25 * (\frac{100 + 94}{2})} = 24.7 * 10^{-4}; \lambda(37.5) = \frac{9}{25 * (\frac{94 + 85}{2})} = 40.2 * 10^{-4};$$

$$\lambda(62.5) = \frac{5}{25 * (\frac{85 + 80}{2})} = 24.2 * 10^{-4}; \lambda(87.5) = \frac{4}{25 * (\frac{80 + 76}{2})} = 20.5 * 10^{-4};$$

$$\lambda(125) = \frac{5}{50 * (\frac{76 + 71}{2})} = 13.6 * 10^{-4}; \lambda(175) = \frac{3}{50 * (\frac{71 + 68}{2})} = 8.6 * 10^{-4};$$

$$\lambda(225) = \frac{3}{50 * (\frac{68 + 65}{2})} = 9 * 10^{-4}; \lambda(275) = \frac{2}{50 * (\frac{65 + 63}{2})} = 6.3 * 10^{-4};$$

$$\lambda(350) = \frac{4}{100 * (\frac{63 + 59}{2})} = 6.6 * 10^{-4};$$

Вычислим количественные характеристики для 3 группы.

Вычислим  $P(t)$  по формуле  $P(t) = \frac{(N_0 - n(t))}{N_0}$  :

$$P(25) = \frac{100 - 5}{100} = 0.95; P(50) = \frac{100 - 13}{100} = 0.87; P(75) = \frac{100 - 20}{100} = 0.8;$$

$$P(100) = \frac{100 - 25}{100} = 0.75; P(150) = \frac{100 - 31}{100} = 0.69; P(200) = \frac{100 - 34}{100} = 0.66;$$

Рассчитываем частоту отказов по формуле  $\alpha(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}$  :

$$\alpha(12.5) = \frac{5}{100 * 25} = 20 * 10^{-4}; \alpha(37.5) = \frac{8}{100 * 25} = 32 * 10^{-4}; \alpha(62.5) = \frac{7}{100 * 25} = 28 * 10^{-4};$$

$$\alpha(87.5) = \frac{5}{100 * 25} = 20 * 10^{-4}; \alpha(125) = \frac{6}{100 * 50} = 12 * 10^{-4}; \alpha(175) = \frac{3}{100 * 50} = 6 * 10^{-4};$$

Рассчитываем интенсивность отказов по формуле  $\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t}$  :

$$\lambda(12.5) = \frac{5}{25 * (\frac{100 + 95}{2})} = 20.5 * 10^{-4}; \lambda(37.5) = \frac{8}{25 * (\frac{95 + 87}{2})} = 35.2 * 10^{-4};$$

$$\lambda(62.5) = \frac{7}{25 * (\frac{87 + 80}{2})} = 33.5 * 10^{-4}; \lambda(87.5) = \frac{5}{25 * (\frac{80 + 75}{2})} = 25.8 * 10^{-4};$$

$$\lambda(125) = \frac{6}{50 * (\frac{75 + 69}{2})} = 16.7 * 10^{-4}; \lambda(175) = \frac{3}{50 * (\frac{69 + 66}{2})} = 8.9 * 10^{-4};$$

Вычислим количественные характеристики для суммы трех групп.

Вычислим  $P(t)$  по формуле  $P(t) = \frac{(N_0 - n(t))}{N_0}$  :

$$P(25) = \frac{300 - 15}{300} = 0.95; P(50) = \frac{300 - 40}{300} = 0.87;$$

$$P(75) = \frac{300 - 58}{300} = 0.81; P(100) = \frac{300 - 70}{300} = 0.77;$$

$$P(150) = \frac{300 - 86}{300} = 0.71; P(200) = \frac{300 - 96}{300} = 0.68;$$

$$P(250) = \frac{300 - 100}{300} = 0.67; P(300) = \frac{300 - 104}{300} = 0.65;$$

$$P(400) = \frac{300 - 111}{300} = 0.63; P(550) = \frac{300 - 116}{300} = 0.61;$$

Рассчитываем частоту отказов по формуле  $\alpha(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}$  :

$$\alpha(12.5) = \frac{15}{300 * 25} = 20 * 10^{-4}; \alpha(37.5) = \frac{25}{300 * 25} = 33.3 * 10^{-4};$$

$$\alpha(62.5) = \frac{18}{300 * 25} = 24 * 10^{-4}; \alpha(87.5) = \frac{12}{300 * 25} = 16 * 10^{-4};$$

$$\alpha(125) = \frac{16}{300 * 50} = 10.7 * 10^{-4}; \alpha(175) = \frac{10}{300 * 50} = 6.7 * 10^{-4};$$

$$\alpha(225) = \frac{4}{300 * 50} = 2.7 * 10^{-4}; \alpha(275) = \frac{4}{300 * 50} = 2.7 * 10^{-4};$$

$$\alpha(350) = \frac{7}{300 * 100} = 2.3 * 10^{-4}; \alpha(475) = \frac{5}{300 * 150} = 1.1 * 10^{-4};$$

Рассчитываем интенсивность отказов по формуле  $\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t}$  :

$$\lambda(12.5) = \frac{15}{25 * (\frac{300 + 285}{2})} = 20.5 * 10^{-4}; \lambda(37.5) = \frac{25}{25 * (\frac{285 + 260}{2})} = 36.7 * 10^{-4};$$

$$\lambda(62.5) = \frac{18}{25 * (\frac{260 + 242}{2})} = 28.7 * 10^{-4}; \lambda(87.5) = \frac{12}{25 * (\frac{242 + 230}{2})} = 20.3 * 10^{-4};$$

$$\lambda(125) = \frac{16}{50 * (\frac{230 + 214}{2})} = 14.4 * 10^{-4}; \lambda(175) = \frac{10}{50 * (\frac{214 + 204}{2})} = 9.6 * 10^{-4};$$

$$\lambda(225) = \frac{4}{50 * (\frac{204 + 200}{2})} = 4 * 10^{-4}; \lambda(275) = \frac{4}{50 * (\frac{200 + 196}{2})} = 4 * 10^{-4};$$

$$\lambda(350) = \frac{7}{100 * (\frac{196 + 189}{2})} = 3.6 * 10^{-4}; \lambda(475) = \frac{5}{150 * (\frac{189 + 185}{2})} = 1.8 * 10^{-4};$$

Строим графики функций:

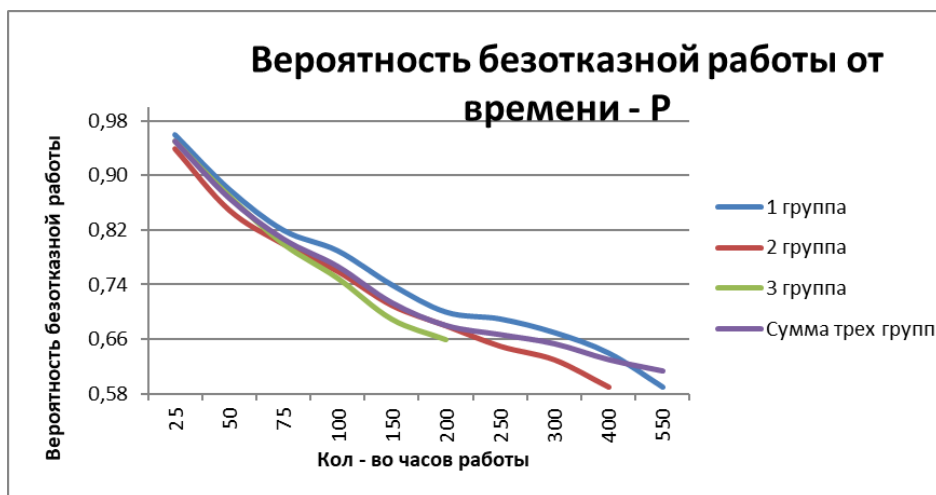


Рис. 7.13. Графики зависимости вероятности безотказной работы от времени



Рис. 7.14. Графики зависимости частоты отказов от времени

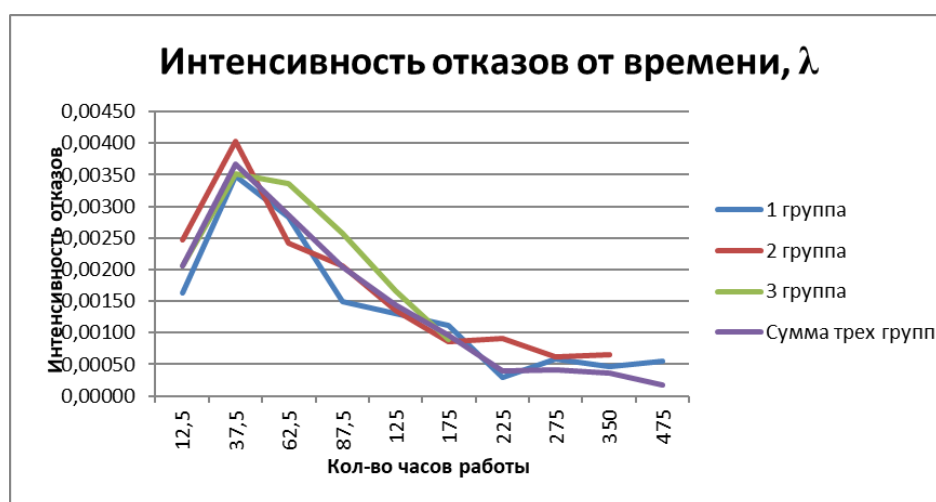


Рис. 7.15. Графики зависимости интенсивности отказов от времени

**Ответ:** Вероятность безотказной работы падает во всех группах на всех промежутках времени.

Частота отказов во всех трех группах наблюдений увеличивалась до 37,5 часов наблюдений. Далее частота до конца наблюдений всех групп стала падать.

Интенсивность отказов во всех трех группах наблюдений увеличивалась до 37,5 часов наблюдений. Далее интенсивность отказов до конца наблюдений всех групп стала падать.

## ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Ремонт пресс-форм.
2. Дисперсия и среднее квадратичное отклонение.
3. Основные понятия надежности.
4. Классификация отказов.
5. Составляющие надежности.
6. Ремонт твердосплавных штампов.
7. Числовые характеристики безотказности.
8. Количественные показатели безотказности.
9. Неисправности штампов и пути их устранения.
10. Нормальный закон распределения наработки до отказа.
11. Ремонт. Виды, сущность.
12. Типичные неполадки в пресс-формах и их устранение.
13. Законы распределения наработки до отказа.
14. Показатели безотказности.
15. Логнормальный закон распределения наработки до отказа.
16. Износ деталей штампов и способы их восстановления.
17. Общие понятия надежности систем.
18. Брак при литье и способы устранения.
19. Сформулируйте понятия: «работоспособность», «надежность», «отказ».
20. Укажите факторы, снижающие работоспособность и надежность средств технологического обеспечения в процессах ОМД.
21. Причины влияния износа поверхностного слоя материала на работоспособность объекта.
22. Влияние смазки на состояние контактирующих поверхностных слоев материала элементов технологического обеспечения системы: пресс-инструмент-заготовка.
23. Дайте определение понятиям «безотказность», «долговечность», «ремонтпригодность», «предельное состояние».
24. Укажите виды отказов и разрушений технологической оснастки и оборудования при ХОШ и ЛШ.
25. Дайте определения износа и износостойкости.
26. Дайте определения долговечности и технического ресурса.
27. Критерии предельного износа.
28. Периоды изнашивания деталей.
29. Чем отличается предельный износ от допускаемого износа.
30. Дайте определение вероятности безотказной работы.



## ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ

1. Пары трения.
2. Виды трения.
3. Виды износа.
4. Упругие сопряжения.
5. Усталостный и кавитационный износ.
6. Коррозийное изнашивание.
7. Ремонт твердосплавных штампов.
8. Износ штампового инструмента.
9. Группирование факторов износов, вызывающих постепенные или внезапные отказы.
10. Твердосплавные вставки штампов.
11. Методы уменьшения интенсивности изнашивания в условиях эксплуатации кузнечно-прессового оборудования и инструмента.
12. Техническое диагностирование как инструмент предупреждения постепенных отказов.
13. Показатели надежности.
14. Показатели долговечности.
15. Математические модели износа штамповой оснастки.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

К настоящему времени достаточно полно исследованы вопросы оценки и обеспечения надежности относительно простых объектов, качество использования которых характеризуется в основном результативностью. Однако с увеличением сложности объектов для их использования (эксплуатация и применение) во все большей степени привлекается обслуживающий персонал, который совместно с этими объектами в зависимости от уровня их сложности и иерархичности образует эргатические системы, объединяемые в свою очередь в технические системы различных уровней. При этом существенно возрастает роль «человеческого фактора», от которого в значительной степени зависит продолжительность (оперативность) выполнения задания. Кроме того, входящие в состав технических систем объекты, являются потребителями больших объемов различных ресурсов, что определяет их ресурсоемкость.

Таким образом, надежность и ее основные свойства (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость) определяются такими свойствами, как результативность, оперативность и ресурсоемкость. При этом ввиду малосерийности, высокой стоимости и уникальности современных технических систем возникают серьезные трудности из-за сложного характера взаимодействия элементов технической системы в условиях конкретной окружающей среды и ограниченного объема получаемой статистической информации об отказах и методах их предупреждения и устранения. Единственным путем устранения этих трудностей является разработка и исследование модели надежности технических систем и решение на этой основе задач анализа и синтеза надежности в условиях дефицита информации о состоянии их элементов.

Решение этих задач, стоящих перед разработчиками теории технических систем, требует привлечения ряда смежных научных дисциплин, а также более углубленного и классифицированного подхода к расчету надежности отдельных объектов и комплексных технических систем.

Знакомство с современными методами оценки и обеспечения надежности технических систем позволят реализовать их рациональные проектные и организационные решения на различных этапах жизненного цикла систем и входящих в их состав элементов (объектов).

Ориентация на рассмотренные в данном пособии материалы поможет выпускникам машиностроительных специальностей, занимающимися вопросами надежности технических объектов и систем, в том числе в области обработки металлов давлением, разрабатывать и применять методы обеспечения надежности перспективных технических систем и их элементов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чебоксаров А. Н. Основы теории надежности и диагностика: курс лекций / А. Н. Чебоксаров. – Омск: СибАДИ, 2012. – 76 с.
2. Семенов, А. С. Основы теории надежности электротехнических систем: учебное пособие для горных инженеров специальности 130400 «Горное дело» специализации «Электрификация и автоматизация горного производства» / А. С. Семенов; Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова. – М.: Перо, 2015. – 106 с.
3. Шубин, Р. А. Надёжность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / Р. А. Шубин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с.
4. Основы теории надежности. Лекции [Электронный ресурс] // Тамбовский государственный технический университет. URL: <http://window.edu.ru/resource/122/38122/files/tstu2005-172.pdf> (дата обращения: 24.12.2022).
5. Основы теории надежности. Лекции [Электронный ресурс] // Казанский национальный исследовательский технологический университет. URL: <https://www.kstu.ru/> (дата обращения: 24.12.2022).
6. Основные понятия надежности [Электронный ресурс] // Allbest.ru База знаний URL: [https://revolution.allbest.ru/manufacture/00517631\\_0.html](https://revolution.allbest.ru/manufacture/00517631_0.html) (дата обращения: 20.01.2023).
7. Основы теории надежности [Электронный ресурс] // Казанский национальный исследовательский технологический университет. URL: [http://window.edu.ru/resource/182/80182/files/Основы\\_теории\\_надежности.pdf](http://window.edu.ru/resource/182/80182/files/Основы_теории_надежности.pdf) (дата обращения: 24.12.2022).
8. Кульбей, А. Г. Учебно-методический комплекс по дисциплине «Техническая диагностика объектов трубопроводного транспорта» для студентов специальности 70.05.01 / А. Г. Кульбей. – Новополюк: ПГУ, Республика Беларусь, 2006.
9. Математическая обработка результатов измерения [Электронный ресурс] // Allbest.ru База знаний URL: <https://allbest.ru/mathematics/00577074.html> (дата обращения: 20.01.2023).
10. Никитенко, В. М. Штампы листовой штамповки. Технология изготовления штамповой оснастки: текст лекций. В 2 ч. Ч. 1 / В. М. Никитенко, Ю. А. Курганова. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 68 с.
11. Основы теории надежности [Электронный ресурс] // Электронно-библиотечная система ibooks.ru URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/340156/reading> (дата обращения: 20.01.2023).
12. Зубрилина, Е. М. Основы надежности машин: учебное пособие / Е. М. Зубрилина, Ю. И. Жевора, А. Т. Лебедев, А. Н. Кулинич. – Ставрополь: СтГАУ, 2010. – 120 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/5746> (дата обращения: 19.02.2023).

13. Износ деталей штампов и способы их восстановления [Электронный ресурс] // Allbest.ru База знаний – URL: [https://allbest.ru/manufacture/00108034\\_0.html](https://allbest.ru/manufacture/00108034_0.html) (дата обращения: 20.01.2023).

14. Схиртладзе, А. Г. Восстановление заданных технических характеристик штампов для холодной штамповки / А. Г. Схиртладзе, В. А. Тимирязев, В. А. Леденев, В. А. Хазанов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2021. – № 11. – С. 10–19. – DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-11-10-19.

15. Ордобаев, Б. С. Надежность технических систем. Техногенный риск: учебное пособие / Б. С. Ордобаев, Б. М. Сеитов, К. О. Кадыралиева, Дж. А. Рыспаев. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2016. – 103 с.

16. Схиртладзе, А. Г. Моделирование штамповой оснастки в Dynaform: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» / [А. Г. Схиртладзе и др.]; под ред. А. А. Погонина; Федеральное агентство по образованию, Белгородский гос. технологический ун-т им. В. Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2008. – 216 с.

17. Петров, М. В. Системный анализ и алгоритмы контроля надежности функционирования автоматизированной системы планирования грузовых перевозок: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.01 / Петров Максим Владимирович – Самара, 2007. – 171 с.

18. Черепанов, Д. А. Расчетно-экспериментальная модель изнашивания опор скольжения коленчатых валов поршневых ДВС: диссертация ... кандидата технических наук: 05.04.02 / Черепанов Дмитрий Андреевич. – СПб., 2004. – 168 с.

19. Евграфов, В. А. Взаимосвязь эксплуатационно-технологических свойств машин и качества их технической эксплуатации в природообустройстве / В. А. Евграфов, А. С. Апатенко, А. И. Новиченко; Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.К. Тимирязева. – М.: ООО «Издательство "Спутник+»», 2015. – 116 с.

20. Рассоха, В. И. Основы теории надежности и диагностика автомобилей: учебное пособие / В. И. Рассоха. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2002. – 143 с.

21. Вьяльцев, А. А. Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / А. А. Вьяльцев; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Московский гос. ин-т электронной техники (технический университет). – М.: МИЭТ, 2009. – 156 с.

22. Апсин, В. А. Специальные главы надежности и основы планирования экспериментов: учебное пособие / В. П. Апсин, Е. В. Бондаренко, В. И. Рассоха; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Оренбургский гос. ун-т». – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 134 с.

23. Юрченко, Н. И. Надежность транспортных машин и транспортно-технологических комплексов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 280400 «Природоустройство» / Н. И.

Юрченко, А. П. Шнырев, Г. А. Ткачев; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования, Московский гос. ун-т природообустройства. – М.: Московский гос. ун-т природообустройства, 2007. – 191 с.

24. Невзоров, В. Н. Надежность машин и оборудования: учебное пособие / В. Н. Невзоров, И. В. Голубев; Федеральное агентство по образованию, ГОУ ВПО «Сибирский гос. технологический ун-т». – Красноярск: Сибирский гос. технологический ун-т, 2008. – 184 с.

25. Рыжаков, В. В. Надежность технических систем и ее прогнозирование: учебное пособие / В. В. Рыжаков. – Пенза: ПензГТУ, [б. г.]. – Часть 1: Надежность технических систем – 2011. – 104 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/62512> (дата обращения: 19.02.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

26. Асадуллин, Э. З. Основы надежности машин: учебное пособие / Э. З. Асадуллин. – Казань: Российский университет кооперации, 2015. – 99 с.

27. Кравченко, И. Н. Основы надежности машин: учебное пособие. Часть 1 / И. Н. Кравченко, В. А. Зорин, Е. А. Пучин, Г. И. Бондарева. – М.: МО РФ, 2007. – 224 с.

28. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: учебник для студентов вузов, обучающихся по инженер.-техн. направлениям и специальностям / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – М.: Логос, 2001. – 206 с.

29. Анилович, В. Я. Надежность машин в задачах и примерах / В. Я. Анилович, А. С. Гринченко, В. Л. Литвиненко. – Харьков: Око, 2001. – 320 с.

30. Бараш, А. Л. Основы надежности машин: учебное пособие для вузов / Л. А. Бараш, В. А. Зорин, В. К. Федоров. – Балашиха: ВТУ при Спецстрое России, 2004. – 134 с.

31. Бочаров, В. С. Основы качества и надежности строительных машин / В. С. Бочаров, Д. П. Волков. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 254 с.

32. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 12 с.

33. ГОСТ 27.003–90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 27 с.

34. Гусев, А. С. Надежность механических систем и конструкций при случайных воздействиях: учебное пособие для вузов / А. С. Гусев, А. Л. Карунин, Н. А. Крамской, С. А. Стародубцева; ред. А. Л. Карунин; Моск. гос. техн. ун-т «МАМИ». – М., 2001. – 283 с. .

35. Животкевич, И. Н. Надежность технических изделий / И. Н. Животкевич, А. П. Смирнов; Техн. б-ка Ин-та испытаний и сертификации вооружения и воен. техники. – М.: Олита, 2003. – 473 с.

36. Зорин, В. А. Надежность машин: учебник для вузов / В. А. Зорин, В. С. Бочаров. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – 549 с.

37. Зорин, В. А. Основы работоспособности технических систем: учебник для вузов / В. А. Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.

38. Александровская, Л. Н. Безопасность и надежность технических систем: учебное пособие / Л. Н. Александровская, И. З. Аронов, В. И. Круглов. – М.: Логос, 2004. – 376 с.
39. Гришко, А. П. Стационарные машины и установки: учебное пособие / А. П. Гришко, В. И. Шелоганов. – М.: Горная книга, 2007. – 320 с.
40. Горелик, А. В. Практикум по основам теории надежности: [Транспортные средства. Системы обеспечения движения поездов]: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности 190901.65 «Системы обеспечения движения поездов» ВПО / А. В. Горелик, О. П. Ермакова. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 132 с.
41. Методы расчета надежности [Электронный ресурс] // Лекции.Орг – публикация материала для обучения URL: <https://lektsii.org/1-25427.html> (дата обращения: 20.01.2023).
42. Озорнин, С. П. Теоретические основы технического сервиса строительных, дорожных и коммунальных машин: учебное пособие / С. П. Озорнин, И. В. Леонтьев; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Читинский гос. ун-т» (ЧитГУ). – Чита: Читинский гос. ун-т, 2008. – 213 с.
43. Власов, В. М. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В. М. Власов, С. В. Жанказиев, С. М. Круглов; под ред. В. М. Власова. – 13-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2017. – 432 с.
44. Карташевич, А. Н. Диагностирование автомобилей. Практикум: учебное пособие / А. Н. Карташевич, В. А. Белоусов, А. А. Рудашко, А. В. Новиков. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2011. – 208 с.
45. Яхьяев, Н. Я. Основы теории надежности и диагностика: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Н. Я. Яхьяев. А. В. Кораблин. – М.: ИЦ «Академия», 2014. – 208 с.
46. Яхьяев, Н. Я. Основы теории надежности и диагностика: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Н. Я. Яхьяев. А. В. Кораблин. – М.: ИЦ «Академия», 2009. – 256 с.
47. Богатырев, А. В. Автомобили: учебник / А. В. Богатырев, Ю. К. Есеновский-Лашков, М. Л. Насоновский; под ред. А. В. Богатырева. – 3-е изд., стер. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 655 с.
48. Набоких, В. А. Испытания автомобиля: учебное пособие / В. А. Набоких. – М.: Форум: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 224 с.
49. Василенко, Н. В. Механика современных специальных систем: технологии, оборудование, исполнит. системы, устройства, узлы, проектирование, показатели качества, САПР [в 3 т.] / Н. В. Василенко [и др.]; под общ. ред. Н. В. Василенко, Н. И. Галибея. – Красноярск: НИИ СУВПТ, 2004. – 558 с.
50. Зеленский, А. В. Электронные средства. Конструкции и расчетные модели: учебное пособие / А. В. Зеленский, Г. Ф. Краснощекова; М-во образования и науки РФ, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования

«Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. С. П. Королёва (Нац. исслед. ун-т)». – Самара: СГАУ, 2010. – 152 с.

51. Владимиров, В. М. Изготовление штампов, пресс-форм и приспособлений: учебник для средних профессионально-технических училищ / В. М. Владимиров. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Высшая школа, 1981. – 431 с.

52. Борюшкина, С. А. Разработка методов реализации резервов и механизмов повышения качества для обеспечения конкурентоспособности продукции: диссертация ... кандидата экономических наук: 08.00.05 / Борюшкина Светлана Александровна – Иркутск, 2010. – 182 с.

53. Трусов, А. Н. Автоматизация технологических процессов и производств: учебное пособие / А. Н. Трусов. – Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2010. – 200 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/6609> (дата обращения: 19.02.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

54. Беляев, С. А. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС: учебное пособие / С. А. Беляев, А. В. Воробьев, В. В. Литвак. – Томск: ТПУ, 2015. – 248 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/82857> (дата обращения: 19.02.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

55. Ананьин, А. Д. Диагностика и техническое обслуживание машин: учебник для студентов высших учебных заведений / А. Д. Ананьин, В. М. Михлин, И. И. Габитов и др. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 432 с.

56. Зорин, В. А. Основы работоспособности технических систем: учебник / В. А. Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.

57. Каштанов, В. А. Теория надежности сложных систем / В. А. Каштанов, А. И. Медведев. – 2-е изд, перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 608 с.

58. Кучер, В. Я. Основы технической диагностики и теории надежности: Письменные лекции / В. Я. Кучер – СПб.: СЗТУ, 2004. – 48 с.

59. Абаимов, Р. В. Основы работоспособности технических систем: методическое пособие / сост.: Р. В. Абаимов, П. А. Малащук. – Сыктывкар: СЛИ, 2004. – 80 с.

60. Кокушин, Н. Н. Основы теории надежности: учебное пособие / Н. Н. Кокушин, А. А. Тихонов, С. Г. Петров и др.; ГОУВПО СПбГТУРП. – СПб., 2011. – 77 с.

61. Иванов, В. И. Техническая диагностика строительных, дорожных и коммунальных машин: учебное пособие / В. И. Иванов, В. Н. Кузнецова, Р. Ф. Салихов и др. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – Ч. 1. Теоретические основы технической диагностики СДКМ. – 132 с.

62. Токарев, А. Н. Основы теории надежности и диагностика: учебник для студентов автотранспортных специальностей / А. Н. Токарев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – 168 с.

63. Ушаков, И. А. Курс теории надежности систем: учебное пособие для вузов / И. А. Ушаков. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.



64. Федотов, А. В. Основы теории надежности и технической диагностики: конспект лекций / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 64 с.
65. Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. Ю. Шишмарев. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
66. Ушаков, И. А. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
67. Шашкин, В. В. Надежность в машиностроении: Справочник / В. В. Шашкина, Г. П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.
68. Калявин, В. П. Надежность и диагностика автотранспортных средств / В. П. Калявин, Н. А. Давыдов. – СПб.: Элмор, 2014. – 466 с.
69. Дружинин, Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г. В. Дружинин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
70. Ястребенецкий, М. А. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами / М. А. Ястребенецкий, Г. М. Иванова. – Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.
71. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
72. Байхельт, Ф. Ф. Надежность и техническое обслуживание: Математический подход / Ф. Ф. Байхельт, П. П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
73. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1969. – 506 с.
74. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения. – М., 1989. – 30 с.
75. Рябинин, И. А. Основы теории надёжности судовых электроэнергетических систем / И. А. Рябинин. – М.: Судостроение, 1971. – 456 с.
76. Червоный, А. А. Надежность сложных систем / А. А. Червоный, В. И. Лукащенко, Л. В. Котин. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 288 с.
77. Авдуевский, В. С. Надежность и эффективность в технике: справочник в 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.). – М.: Машиностроение, 1990.
78. Никитин, В. А. Основы эксплуатации космических средств: учебник для вузов / под ред. д.т.н., проф., В. А. Никитина. – СПб.: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 2000. – 499 с.
79. Морозов, Л. М. Методологические основы теории эффективности: учебное пособие / Л. М. Морозов, Г. Б. Петухов, В. Н. Сидоров. – СПб.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1982. – 236 с.
80. Волков, Л. И. Надёжность летательных аппаратов: учебное пособие для авиационных вузов / Л. И. Волков, А. М. Шишкевич. – М.: Высшая школа, 1975. – 296 с.
81. Волков, Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов: учебное пособие / Л. И. Волков. – М.: Высшая школа, 1981. – 368 с.

82. Калявин, В. П. Надежность и техническая диагностика судового оборудования и автоматики: учебник / В. П. Калявин, А. В. Мозгалеvский, В. Л. Галка. – СПб.: Элмор, 1996. – 296 с.
83. Юсупов, Р. М. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / Р. М. Юсупов, В. И. Городецкий, А. К. Дмитриев, В. М. Марков и др. – Л.: Энергия, 1978. – 192 с.
84. Юсупов, Р. М. Методы теории стохастической индикации в прикладной кибернетике: учебное пособие / Р. М. Юсупов, Г. Б. Петухов. – Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1975. – 155 с.
85. Сорокин, А. А. Оценка показателей надежности электронных устройств и систем: учебное пособие / А. А. Сорокин, П. С. Алексеев. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – СПб., 2003. – 88 с.
86. Сугак, Е. В. Надежность технических систем: учебное пособие для студентов технических специальностей вузов / Е. В. Сугак, Н. В. Василенко. – Красноярск: НИИ СУВПТ, 2000. – 608 с.
87. Дружинин, Г. В. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах: учебное пособие для студентов радиотехн. специальностей вузов / Г. В. Дружинин, С. В. Степанов, В. Л. Шихматова, Г. А. Ярыгин. – М.: Энергия, 1976. – 448 с.
88. Острейковский, В. А. Теория надежности: учебник для вузов / В. А. Острейковский. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
89. Маслов, А. Я. Эксплуатация АСУ: учебник / А. Я. Маслов, Б. С. Абраменко, Л. Н. Немудрук; ВИКА им. А.Ф. Можайского. – Л., 1985. – 450 с.
90. Голинкевич, Т. А. Прикладная теория надёжности: учебник для вузов / Т. А. Голинкевич. – М.: Высшая школа, 1977. – 160 с.
91. Половко, А. М. Сборник задач по теории надёжности / А. М. Половко, И. М. Маликов, А. Н. Жигарев, В. И. Зарудный. – М.: Советское радио, 1972. – 408 с.
92. Райкин, А. Л. Вероятностные модели функционирования резервных устройств / А. Л. Райкин. – М.: Наука, 1971. – 216 с.
93. Санников, В. А. Основы теории надёжности: учебное пособие / В. А. Санников. – Л.: Ленинградский механический институт, 1972. – 100 с.
94. Груничев, А. С. Надежность электрорадиоизделий при хранении / А. С. Груничев, Ю. З. Веденеев, В. М. Елкин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с.
95. Мур, Дж. Х. Использование резервирования в системах управления / Дж. Х. Мур, Б. К. Уайт // Вопросы ракетной техники №7. – 1968. – 225 с.
96. Стахов, А. П. Алгоритмическая теория измерения / А. П. Стахов. – М.: Знание, 1979. – 64 с.
97. Пестрецов, С. И. Надежность технологического оборудования: лабораторные работы / авт.-сост.: С. И. Пестрецов, В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 36 с.
98. Хрущов, М. М. Классификация условий и видов изнашивания деталей машин / М. М. Хрущов // Сб. 8 «Трение и износ в машинах». – М.: Изд-во АН СССР, 1953.

99. Розенфельд, И. Л. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов / И. Л. Розенфельд, К. А. Жиганова. – М.: Металлургия, 1966.
100. Рудобашта, С. П. Надежность и долговечность машин и аппаратов химических производств: Текст лекций / С. П. Рудобашта, В. Н. Долгунин. – М.: МИХМ, 1984. – 49 с.
101. Зубова, А. Ф. Надежность машин и аппаратов химических производств / А. Ф. Зубова – Л.: Машиностроение, 1978. – 215 с.
102. Самойлов, Г. В. Надежность машин и аппаратов химических производств : учебник для химико-технол. спец. вузов / Г. В. Самойлов. – М.: Химия, 1973. – 222 с.
103. Базовский, И. Надежность. Теория и практика / И. Базовский. – М.: Мир, 1965. – 373 с.
104. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2016.
105. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2021.

Учебное издание

МОРОЗОВ Олег Игоревич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ  
НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

Редактор М. В. Теленкова

ЛР № 020640 от 22.10.97.

Подписано в печать 11.09.2023. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 10,00. Тираж 50 экз. Заказ 396. ЭИ № 1866.

Ульяновский государственный технический университет,  
432027, Ульяновская область, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, Ульяновская область, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.