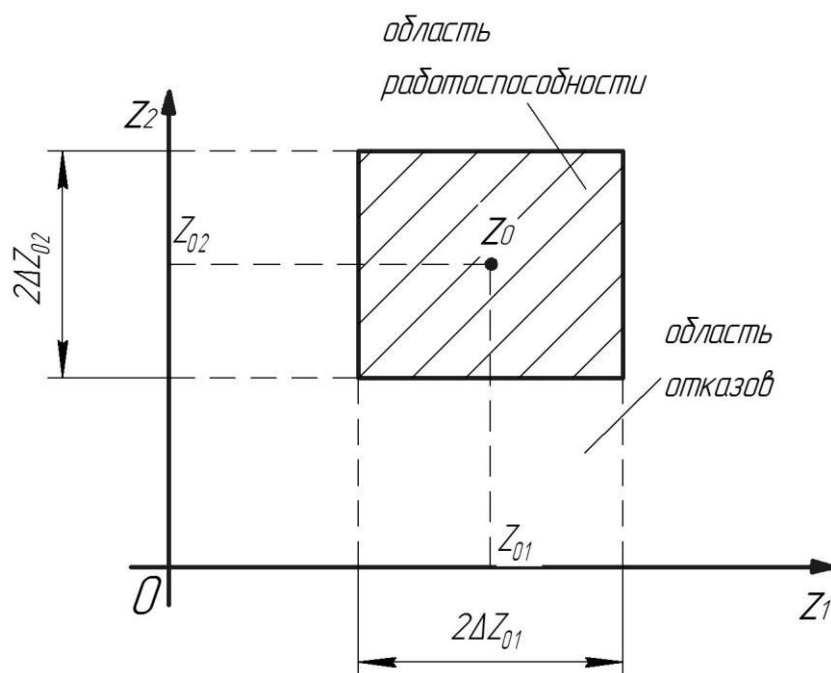


# НАДЕЖНОСТЬ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие



Санкт-Петербург  
2013

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**  
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ**  
**ПОЛИМЕРОВ»**

---

**НАДЕЖНОСТЬ МАШИН**  
**И**  
**ОБОРУДОВАНИЯ**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург**  
**2013**

УДК 676.05(075)

ББК 35.77 я 7

Н 171

Надежность машин и оборудования: учебное пособие/ Н.Н. Кокушин, А.А. Тихонов, С.Г. Петров, В.Е. Головки, И.В. Ключкин; СПбГТУРП.-СПб., 2013.- 67 с.: ил. 12 .

В пособии рассмотрены цели и задачи науки о надежности техники, дана достаточно полная сводка основных понятий и показателей надежности. Приведена краткая характеристика надежности основного оборудования ЦБП. Изложены методы обеспечения надежности промышленного оборудования на основных этапах его жизненного цикла.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 151000.62 «Технологические машины и оборудование» (сокращенной формы обучения).

Рецензенты: генеральный директор ООО «ЦНИИбуммаш Инжиниринг»

В.И. Макаров;

заведующий кафедрой машин автоматизированных систем СПбГТУРП, профессор А.А. Гаузе.

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

---

Редактор и корректор Т. А. Смирнова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2013 г., поз. 3

---

Подп. к печати 21.01.13.

Формат 60×84/16. Бумага тип. №1.

Печать офсетная. Печ. л. 4,5

Уч.-изд. л. 4,5.

Тираж 50 экз. Изд. № 3.

Цена «С».

Заказ

---

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, СПб, ул. Ивана Черных, 4.

© Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2013

© Кокушин Н.Н., Тихонов А.А., Петров С.Г.  
Головки В.Е., Ключкин И.В., 2013

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСА**

В настоящем пособии рассматриваются следующие вопросы:

- 1) Достаточно полная сводка основных понятий и показателей надежности. Цели и задачи науки о надежности техники.
- 2) Характеристика надежности основного оборудования целлюлозно-бумажной промышленности.
- 3) Основные этапы жизненного цикла техники (например, машин и аппаратов, их элементов и др.).
- 4) Методы обеспечения надежности промышленного оборудования (в частности машин и аппаратов ЦБП) на основных этапах его жизненного цикла.

Основной задачей курса «Надежность машин и оборудования» является характеристика надежности отраслевого оборудования в соответствии со специальностями подготовки на факультете МАП (машин автоматизированных производств).

Наука о надежности техники, особенно о надежности используемого на предприятиях промышленного оборудования, является частью широко понимаемой науки о машинах (т.е. частью машиноведения), поэтому предметы по надежности, читаемые для будущих инженеров-механиков ЦБП, примыкают к таким предметам их учебных программ, как теория машин и механизмов, сопротивление материалов, детали машин, оборудование ЦБП и др.

В технических вузах России предметы по надежности техники читаются с привязкой к соответствующим видам техники, поэтому они даются после предметов по оборудованию соответствующих отраслей или одновременно с ними.

## **2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ НАДЕЖНОСТИ**

### **2.1. Технический объект, элемент, система**

В науке о надежности прежде всего используются такие обобщённые понятия как технический объект (изделие), элемент, система.

Характерными примерами технических объектов для инженеров-механиков являются машина, аппарат, их узлы, детали (когда они имеют самостоятельные характеристики надежности).

В зависимости от конкретной задачи то или иное изделие можно рассматривать как систему элементов или как элемент более сложной системы.

Например, бумагоделательная машина (БДМ), с одной стороны, это система её основных частей и вспомогательных систем, а с другой стороны БДМ - это элемент технологической линии предприятия ЦБП.

## 2.2. Состояния технических объектов

Понятия надежности используются также для характеристики состояния технических объектов (изделий) с позиций надежности.

Это следующие понятия: работоспособное (или нет) состояние изделия, исправное (или неисправное) его состояние.

Эти понятия (работоспособное и исправное состояния технического объекта) близки друг к другу, но они не всегда совпадают.

Так, согласно ГОСТ 27.002-89 работоспособное состояние технического объекта - это такое, при котором данный технический объект может выполнять все свои функции с сохранением всех требуемых характеристик (например, для машины как своих, так и выпускаемой продукции) в заданных пределах.

Нарушение работоспособности технического объекта (машины) называется его отказом.

Отказы техники считаются случайными событиями, так как каждый отказ обычно происходит по нескольким причинам (включая основные) в их случайных сочетаниях (примеры см. ниже). Кроме того, время отказа (Т) также случайная величина (ввиду трудности точного прогнозирования моментов времени отказов).

Исправное состояние объекта (согласно тому же ГОСТу) это такое, при котором он (объект) полностью соответствует всем требованиям технической документации на него (для машин и аппаратов это прежде всего соответствие чертежам).

Нарушение исправности изделия называется его повреждением.

Исправная техника в принципе всегда работоспособна, хотя может требовать доводки, наладки, смазки и др.

Работоспособная техника, наоборот, может быть не всегда полностью исправной. Например, наличие вмятин, выбоин на станинах машины, строго говоря, это неисправности (повреждения), так как их нет на чертежах машин. Но обычно такие небольшие повреждения не влияют на работоспособность машин.

## 2.3. Надежность технических объектов

Основным понятием науки о надежности является сама надежность техники.

**Надежность техники** – это её свойство выполнять все свои функции в течение некоторой заданной наработки и в требуемых условиях эксплуатации с сохранением всех необходимых характеристик работоспособности техники и выпускаемой продукции в заданных пределах.

## **Характеристика понятия надежности**

Новая техника может иметь высокие начальные характеристики (по качеству работы и др.), но если они в ходе работы быстро ухудшаются, то такая техника имеет низкую надежность и обычно в целом низкую эффективность использования (например, низкую экономическую эффективность).

Современное развитие техники характеризуется интенсификацией режимов её работы, усложнением конструкции, объединением машин и аппаратов в технологические линии, автоматизацией.

Всё это повышает вероятность различных сбоев в работе, отказов, т. е. ухудшает стабильность, бесперебойность работы техники.

Кроме того надежность снижается в ходе эксплуатации из-за старения техники (в результате износа, коррозии и др.).

Обеспечение и поддержание надежности техники при эксплуатации - это главная задача таких служб предприятий ЦБП (и химической промышленности в целом), как служба главного механика (ОГМ –отдел главного механика), главного энергетика (ОГЭ), контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА). Поэтому положения науки о надежности техники прежде всего отвечают запросам инженеров-эксплуатационников (механиков и др.).

Но они (эти положения) также активно используются и при разработке новой техники (например, новых машин и аппаратов) инженерами-механиками (конструкторами, проектировщиками).

### **2.3.1. Надежность как свойство техники**

Надежность – это комплексное, сложное свойство техники, надежная техника должна быть:

- 1) безотказной;
- 2) достаточно долговечной;
- 3) ремонтпригодной (т.е. допускать быстрое и нетрудоёмкое устранение отказов и их последствий);
- 4) надежность техники должна сохраняться как при работе, так и при транспортировке, хранении её и др., здесь важно также свойство «сохраняемость надежности».

Представления о надежности техники развивались постепенно.

Первоначально (с начала века машин – начала XIX века) считалось, что надежность есть безотказность (эти слова – синонимы). Соответственно при обеспечении надежности техники заботились лишь о безотказности.

Затем при этом стали также заботиться и о достаточной долговечности техники (расширили понятие надежности, включив в него и долговечность).

Наконец, сейчас при этом заботятся и о ремонтпригодности и о сохраняемости надежности. Таким образом, в понятие надежности постепенно были включены указанные выше 4 аспекта надежности (4 простых свойства надежности).

На сегодня безотказность иногда называют надежностью в узком смысле слова. Согласно ГОСТ 27.002-89[7] надежность техники сейчас считается её комплексным, сложным свойством, являющимся каждый раз тем или иным сочетанием указанных выше простых свойств надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости надежности).

Конкретно это выражается в том, что полная характеристика надежности какого-либо конкретного изделия (технического объекта) даётся в виде комплекса показателей надежности. Каждый из таких показателей чаще характеризует какое-либо одно простое свойство надежности, но иногда один показатель надежности одновременно характеризует два или более простых свойств надежности.

Вид таких комплексов показателей для данной машины (аппарата) или для их элементов и требуемые численные значения показателей назначаются при разработке проекта технического объекта (например, машины) инженерами-конструкторами обычно исходя из данных эксплуатации аналогичных технических объектов (или по другим соображениям).

### **2.3.2. Актуальность проблемы надежности**

Надежность техники и ее обеспечение - одна из основных проблем народного хозяйства в целом.

Важность обеспечения надежности техники вытекает из следующего:

1. Низкая надежность используемой техники прежде всего ведёт к большим затратам на ее ремонт

Так, в СССР в 80–е гг. XX века в сфере ремонта техники было занято примерно 6 млн. человек. Здесь использовалось 25 % всего станочного парка страны (прежде всего для изготовления запчастей), 10 % ежегодного выпуска чёрных металлов (для тех же целей) и т.д.

Даже небольшое повышение надежности какого-либо широко применяемого оборудования (например, электродвигателей, насосов) может дать большой экономический эффект в масштабах страны (отрасли).

2. Отказы техники с тяжелыми последствиями (аварии) могут приводить к полной утрате техники и к человеческим жертвам (например, на транспорте, ГЭС, АЭС).

Дополнительно в ЦБП и химической промышленности в целом актуальность проблемы надежности вызвана следующим:

3. Наличие развитых технологических линий на предприятиях этих отраслей, так как отказ одного элемента линии может остановить линию в целом.

4. Высокий средний возраст установленного оборудования (особенно в ЦБП). В ходе эксплуатации надежность техники снижается из-за её старения (вследствие износа, коррозии, развития усталостных явлений и др.), соответственно внимание к обеспечению надежности в ходе эксплуатации оборудования должно повышаться.

Использование новой техники не снимает проблемы надежности из-за более интенсивных режимов её работы (например, вследствие роста рабочих скоростей, давления, температур), усложнения конструкций, автоматизации и др. (автоматизация предъявляет повышенные требования к надежности автоматизируемого оборудования).

### 2.3.3. Развитие науки о надежности техники

Начало широких исследований по надежности относится к периоду конца Второй мировой войны (Великой Отечественной войны), когда выявилась низкая надежность некоторых новых видов оружия (например, радаров в Англии и США, ракетного оружия типа ракет Фау-2 в Германии и др.).

Самое начало исследований по надежности техники относится к началу XX века. Оно было связано с обеспечением надежности подшипников качения. Затем в течение достаточно длительного периода времени (примерно до начала Второй мировой войны) исследования надежности и её обеспечение проводились применительно к радио- и электротехнике.

В целом развитие науки о надежности техники проходило в несколько этапов.

1. В начале развития науки о надежности считалось, что отказы техники это неизбежные случайные события. Соответственно, экспериментально изучались, например, распределения сроков службы до отказа в группах одинаковых невосстанавливаемых или восстанавливаемых изделий (например, подшипников, элементов радио - и электросхем и др.). При этом, например, часто выявлялось, что случайная величина  $T$ - срок службы до отказа - подчинялась нормальному закону, известному из теории вероятности. Иначе говоря, в группе таких одинаковых изделий имелся какой-то средний срок службы до отказа  $T_{cp}$  и некоторое рассеяние сроков службы  $T_i$  вокруг  $T_{cp}$ , примерно симметричное в обе стороны (с уменьшением плотности расположения реализаций  $T_i$  на оси времени в обе стороны от  $T_{cp}$ ). В таких случаях одна из функций распределения случайной величины  $T$ , а именно, функция плотности вероятности  $f$ , имела вид функции Гаусса (рис. 2.1).



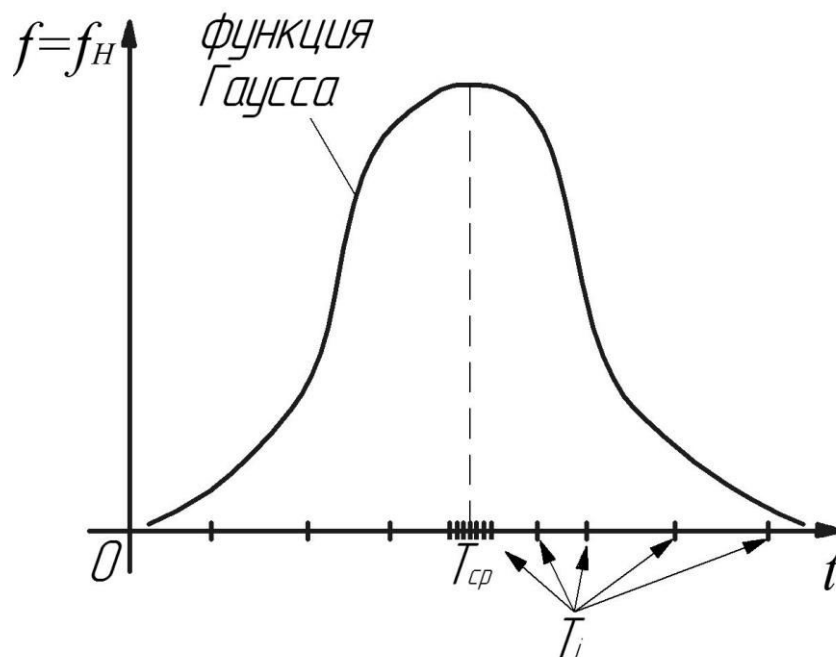


Рис. 2.1. Функция  $f_H$  при нормальном законе распределения случайной величины  $T$

В технике, в частности в теории надежности, функция  $f$  часто называется функцией плотности расположения реализаций  $T_i$  на оси времени  $t$ .

Когда случайная величина  $T$  подчиняется нормальному распределению, говорят, что в данном случае выполняется нормальный закон надежности.

Если такие экспериментальные данные были получены для элементов сложных технических систем (радиосхем, машин), то по ним математически оценивалась надежность этих систем в целом.

В тот же период начали разрабатывать и издавать первые стандарты по надежности (прежде всего по основным понятиям и терминам надежности). Так, в США первые такие стандарты были изданы в 1952 году. Стандартизация основных терминов надежности во многом была вызвана запросами юридической практики по вопросам взаимоотношений промышленных и других предприятий и организаций.

Указанный этап развития науки о надежности продолжался примерно с начала XX века по 1955 г.

2. Далее большое внимание стало уделяться изучению причин отказов техники и разработке методов их предотвращения.

Поскольку одной из основных причин отказов является старение техники, то усилились исследования процессов износа, коррозии, развития усталостных явлений и др. и методов их предотвращения (замедления).

В результате многие отказы перестали восприниматься как неизбежные случайные события. При описании закономерностей надежности наряду с чисто вероятностным иногда начал использоваться и детерминистский подход (на основе законов физики и др.).

Данный этап длился примерно с 1955 г. по 1980 г.

3. 3-й этап развития науки о надежности техники длится примерно с 1980 г. по настоящее время.

Сейчас на основе накопленного опыта разрабатываются практические рекомендации по обеспечению и повышению надежности на основных этапах жизненного цикла техники (см. главу 6).

#### 2.3.4. Простые свойства надежности

1. **Безотказность**- это свойство техники *непрерывно* сохранять свою работоспособность в течение некоторой заданной наработки.

Наработка- объём работы изделия (технического объекта), выраженный, например, в единицах времени (тогда это чистое время работы изделия за какой-то срок службы), либо в пройденном километраже (для транспортных машин), либо в единицах выработанной продукции (для технологического оборудования, то есть выпускающего какую-либо продукцию) и т. д.

Свойство безотказности техники наиболее важно в следующих случаях:

- когда велика цена каждого отказа (например, в авиации и др.);
- при необходимости непрерывного режима работы изделия (например, для оборудования ЦБП, химической промышленности).

2. **Долговечность**- это свойство техники *длительно* сохранять свою работоспособность (обычно до наступления предельного состояния техники) при соблюдении всех требований системы технического обслуживания и ремонта (СТОиР) и правил эксплуатации в целом.

Предельное состояние техники- это такое, при котором её дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна (например, из-за появления неустранимой угрозы безопасности работающих, недопустимого и неустранимого снижения качества работы (как, например, на сильно изношенном металлорежущем станке и др.).

При наступлении предельного состояния изделия оно подлежит списанию или капитальному ремонту.

Признаки (критерии) предельного состояния изделия должны указываться в проектной документации на него вместе с проектным сроком службы изделия. Они являются основанием для списания или капитального ремонта изделия.

Свойство долговечности техники наиболее важно с позиций экономики. Действительно, техника должна отработать достаточно долго, чтобы окупились затраты на её приобретение и была получена необходимая прибыль.

3. **Ремонтопригодность**- это приспособленность техники к быстрому и нетрудоёмкому нахождению места и причины отказа, такому же (быстрому и нетрудоёмкому) устранению отказа и его последствий, а также предупреждению возможных отказов.

Свойство ремонтпригодности важно, например, для уменьшения простоев на ремонт после отказов (например, при непрерывном режиме работы техники) и соответствующего уменьшения экономических потерь от невыпуска продукции из-за этих простоев.

4. **Сохраняемость надежности**- это свойство техники сохранять свою работоспособность (через три вышеуказанные простые свойства надежности) как при работе, так и на всех остальных стадиях существования техники (при её хранении, транспортировке и т.д.).

Это свойство на производстве важно, например, при хранении запчастей к оборудованию на складе, при хранении оборудования перед монтажом, при транспортировке его с завода- изготовителя на целлюлозно-бумажное предприятие и т.д.

Указанные простые свойства надежности обеспечиваются на всех стадиях существования техники (в частности, машин и аппаратов) - при создании техники (её проектировании и изготовлении) и при эксплуатации.

Каждое простое свойство надежности количественно характеризуется своими показателями надежности (см. главу 5). Некоторые показатели надежности одновременно характеризуют два или более простых свойства надежности.

### **2.3.5. Надежность как часть общей характеристики качества техники**

В целом надежность характеризует лишь одну из сторон качества техники.

Действительно, все показатели качества техники делятся на несколько групп, а именно:

1) показатели назначения (например, для БДМ это её производительность, ассортимент и требуемое качество продукции, рабочая скорость, потребляемая мощность привода и многое др.);

2) показатели надежности (см. ниже) и т.д. вплоть до показателей эргономичности (соответствия техники возможностям человека), технической эстетики, безопасности.

Показатели надежности в целом количественно характеризуют сохраняемость исходного качества изделия при его эксплуатации (а также и на других стадиях существования техники).

Надежность техники можно считать также частью более широкого понятия - эффективности техники.

Эффективность техники- это её способность выполнять свои функции с требуемым высоким качеством работы и с высокой экономической отдачей.

В целом надежность техники может быть идеальной, базовой, эксплуатационной.

**Идеальная надежность**- это тот предельно высокий уровень надежности изделий данного вида, который можно достичь при использовании всех возможностей повышения надежности этих изделий независимо от их

стоимости и эффективности (даже если такое повышение надежности экономически не окупается).

**Базовая надежность** - экономически оправданный уровень надежности техники, который заложен в неё при создании (при проектировании и изготовлении), например, в конструкцию данной машины (аппарата, их элементов).

**Эксплуатационная надежность** - это фактический уровень надежности изделия в данных условиях эксплуатации.

## **2.4. Характеристика техники с точки зрения возможности и необходимости её ремонта и технического обслуживания**

С точки зрения возможности и необходимости ремонта и технического обслуживания конкретные изделия (например, машины и аппараты) могут быть ремонтируемые или неремонтируемые, восстанавливаемые или невозстанавливаемые, обслуживаемые или необслуживаемые.

Понятия «ремонтируемая или восстанавливаемая техника» близки друг к другу, но они не полностью совпадают.

Так, если в технической документации на изделие указано, что после отказов оно может быть отремонтировано (с указанием технологии ремонта после конкретных отказов), то данное изделие является ремонтируемым.

Если же работоспособность техники после отказов может быть восстановлена в данных конкретных условиях (например, путём ремонта), то эта техника является восстанавливаемой в этих условиях.

Иначе эта техника невозстанавливаемая в данных условиях.

*Пример.* На предприятиях ЦБП все подшипники качения - это невозстанавливаемые изделия из-за отсутствия на этих предприятиях оборудования для ремонта таких подшипников. Подшипники качения после многих видов отказа - это ремонтируемые изделия, так как они часто могут быть отремонтированы, но на предприятиях шарикоподшипниковой промышленности, где имеются оборудование и условия для ремонта подшипников качения.

Если изделия (например, машины и аппараты и элементы их конструкций) при эксплуатации требуют технического обслуживания, то это обслуживаемые изделия. Иначе - это изделия необслуживаемые.

## **2.5. Резервирование техники**

Резервирование – это метод повышения надежности техники путем использования различных дополнительных средств повышения надежности сверх минимально необходимых для нормальной работы этой техники.

Существуют различные виды резервирования: структурное, нагрузочное и др.

Так, при структурном резервировании в структуру изделия (например, в конструкцию машины, электрическую схему, технологическую линию предприятия) для повышения надежности добавляются резервные элементы, обычно одинаковые с основными.

Резервные элементы чаще используются при отказах основных и вместо них (например, резервные насосы в цехе) – это примеры ненагруженного резерва. Когда резервные элементы работают всё время, в том числе и одновременно с основными – это нагруженный резерв (примеры см. главу 4).

Отношение числа резервных элементов к числу основных элементов, резервируемых ими, называется кратностью резервирования (структурного). При кратности резервирования, равной единице - дублирование.

При нагрузочном резервировании используется способность элементов изделий (или изделий в целом) нести повышенную нагрузку (в широком смысле слова) по сравнению с минимально необходимой для нормальной работы.

Например, при конструировании машин для повышения надежности часто в конструкцию закладывается завышенная прочность основных элементов конструкции (см. курс «Детали машин» – коэффициенты запаса прочности).

В проекты машин и аппаратов нередко закладываются также завышенные скорость и мощность привода (например, для возможности последующей модернизации машины с увеличением её рабочей скорости или нагрузки на привод). В проекты систем трубопроводов может закладываться завышенная пропускная способность отдельных участков трубопроводов (например, при угрозе их засорения) и т.д.

### **Виды структурного резервирования**

*Структурное резервирование* может быть общим (резервирование изделия – например, машины в целом) или отдельным (резервирование отдельных элементов системы (изделия) – например, отдельных элементов технологической линии).

При отдельном резервировании элементов конструкции машины на складе может иметься неснижаемый запас запасных узлов (деталей) – запчастей.

В теории надежности показано, что отдельное резервирование (дублирование) всех элементов последовательной (с точки зрения надежности) технической системы больше повышает её надежность, чем дублирование такой системы в целом (например, наличие резервной машины). Поэтому

обычно не устанавливают рядом с основными машинами и аппаратами таких же резервных изделий (хотя иногда встречаются и указанные случаи, например, резервирование

насосов), а к каждой машине (аппарату) на складе имеется набор запчастей (запасные узлы, детали).

*Резервирование замещением* – это вид структурного резервирования, при котором резервные элементы используются только при отказе основных и вместо них (это практически случай ненагруженного резерва).

*Скользящее резервирование.* При этом виде резервирования группа одинаковых основных элементов изделия (например, одинаковых подшипников машины) имеет общий резерв в виде также группы одинаковых элементов. При отказе любого из основных элементов он заменяется на любой из запасных.

*При функциональном резервировании* имеется возможность при отказе какого-то элемента изделия использовать взамен него какой-либо другой элемент этого изделия, который наряду со своей основной функцией может (хотя бы в какой-то мере) выполнять функцию отказавшего элемента.

В целом резерв изделия (например, машины, аппарата) – это совокупность всех средств повышения его надежности путем использования резервирования различных видов.

## **2.6. Отказы техники**

Выше было сказано, что отказ – это случайное событие, заключающееся в нарушении (утрате) работоспособности технического объекта. При эксплуатации техники её отказы – одно из главных понятий надежности.

Отказы техники считаются случайными событиями, так как каждый отказ обычно происходит в силу ряда причин (включая основные) в их случайных сочетаниях. Время наступления отказа  $T$  также величина случайная.

### **2.6.1. Причины отказов техники**

Исправная и работоспособная техника обычно отказывает из-за того, что при работе, а также при хранении, транспортировке и т.д. она подвергается различным воздействиям.

Такие воздействия прежде всего можно разделить на две группы:

- 1) внешние воздействия (механические, тепловые, химические и т.д.);
- 2) внутренние воздействия (например, воздействие привода на машину, деталей машины друг на друга при передаче усилий).

К внутренним воздействиям можно отнести и действие остаточных напряжений в литых (особенно тонкостенных) деталях машин, под влиянием которых со временем происходят остаточные деформации (коробление) этих литых деталей.

При указанных воздействиях на технику действуют разные виды энергии (механическая, химическая, тепловая, электромагнитная, энергия света и т.д.).

В результате данных воздействий в элементах техники (например, в узлах и деталях машин и аппаратов) могут происходить различные процессы, приводящие к появлению изменений в элементах техники.

Так, на технологическом оборудовании, т. е. на оборудовании, вырабатывающем какую-либо продукцию, наряду с основными технологическими процессами выработки продукции в элементах конструкции оборудования обычно происходят различные вторичные (сопутствующие) процессы (износ деталей, коррозия, развитие усталостных явлений, вибрации, упругие и пластические деформации деталей и т.д.).

Таковыми сопутствующими процессами, часто сильно влияющими на надежность оборудования, механические службы предприятий, должны постоянно заниматься – контролировать их развитие, по возможности устранять вредное влияние их на работоспособность (в частности, на надежность) оборудования.

Прежде всего такие вторичные процессы можно разделить на группы по скорости их протекания (развития):

- 1) быстроразвивающиеся процессы (например, вибрации конструкции, её быстрые деформации, поломки). Скорость развития таких процессов – доли секунды, секунды;
- 2) процессы, развивающиеся со средней скоростью (это, например, тепловые деформации конструкций, износ режущего инструмента). Их время развития – минуты, часы, дни;
- 3) медленно развивающиеся процессы (основные виды износа, коррозия, усталостные явления, коробление и др.). Время развития таких процессов – недели, месяцы, годы.

В результате развития вторичных процессов в элементах техники возникают и развиваются различные изменения, которые могут быть обратимыми (исчезающими после устранения их причин) и необратимыми (остающимися после устранения этих причин).

К обратимым изменениям относятся, например, вибрации, упругие деформации, умеренные тепловые деформации (они устраняются при устранении их причин – при снятии механических нагрузок, нагрева). Примерами необратимых изменений в конструкциях машин являются следы износа, коррозия, усталостные явления (вплоть до поломок деталей) – они остаются, например, при остановках машин, устранении коррозионной среды.

Часто указанные изменения (как обратимые, так и, особенно, необратимые) могут быть сильно выражены. Они могут значительно изменить техническое состояние оборудования и ухудшить его работоспособность вплоть до отказов (вплоть до потери работоспособности техники).

После отказов (например, остановок машин из-за поломок их деталей) проводится послеаварийный ремонт для устранения отказов и их последствий

(для восстановления работоспособности техники). Отказы оборудования (например, при поломках деталей и узлов) могут происходить как из-за происходящих в элементах конструкции прогрессирующих вторичных процессов, так и вследствие случайных перегрузок, перегревов, заклиниваний деталей и т.д.

Для предупреждения назревающих отказов оборудования, например, из-за износа, периодически (согласно плану) проводится плановый предупредительный ремонт (ППР), включающий ревизию оборудования (его разборку и контроль состояния (степени износа и др.)) и сам предупредительный ремонт изношенных узлов и деталей.

Наиболее простым и распространённым методом как непланового послеаварийного, так и планового предупредительного ремонтов является простая замена отказавших или изношенных элементов конструкции на запасные (новые или восстановленные).

Непрерывно работающая техника периодически останавливается на планово-предупредительный ремонт (ППР), на периодически работающем оборудовании ППР проводится обычно в нерабочие смены (например, ППР металлорежущих станков в ремонтных цехах ЦБК, работающих в одну смену).

Остановки техники могут быть и не связаны с отказами и ремонтом (например, из-за перебоев в снабжении сырьем, подаче пара, электроэнергии и др.). Поэтому при оценке надежности по данным эксплуатации следует учитывать лишь истинные отказовые ситуации.

## **2.6.2. Виды отказов техники**

В ГОСТ 27.002-89 дана классификация отказов техники, обязательная для применения.

Согласно ей все отказы техники (например, оборудования) делятся на следующие виды:

### **1) Отказы внезапные и постепенные**

Согласно указанному ГОСТу признаки этих видов отказов следующие.

Внезапные отказы – это такие, при которых какие - либо характеристики техники меняются резко, скачком (например, при поломках деталей резко меняется их форма, при пробое конденсаторов их ёмкость скачком уменьшается до нуля и др.).

При постепенных отказах аналогичные параметры меняются постепенно (например, при износе детали, приведшем к отказу, постепенно уменьшаются её поперечный размер и масса, при короблении тонкостенной литой детали постепенно изменяется её форма).

Можно также сказать, что при внезапных отказах неожиданно (внезапно) возникают их причины, а предпосылки постепенных отказов развиваются постепенно.

### **2) Отказы явные и скрытые**



Явные отказы – это такие, которые устанавливаются простым наблюдением (например, поломки элементов конструкции и отсюда отказы машин и аппаратов).

Скрытые отказы устанавливаются с помощью специальных измерений (размеров, массы деталей и др.). Например, факт скрытого отказа машины, вырабатывающей продукцию, при выработке ею брака устанавливается измерениями характеристик качества этой продукции (например, на металлорежущих станках, БДМ).

### 3) Отказы независимые и зависимые друг от друга

Например, после поломки цапфы вала при его падении возможна также поломка бочки этого вала. Здесь поломка бочки является отказом, зависимым от поломки цапфы вала.

### 4) Сбои

Сбои – это самоустраняющиеся отказы.

Например, при колебаниях температуры окружающей среды часто «плывут» характеристики некоторых элементов электронных схем (например, так может меняться ёмкость конденсаторов). При этом способность выполнять свою функцию у электронной схемы в целом может быть нарушена вплоть до отказа схемы.

При восстановлении температуры окружающей среды отказ схемы самоустраняется, так как характеристики элементов приходят в норму.

### 5) Перебегающие отказы

Это многократно повторяющиеся одинаковые самоустраняющиеся отказы типа сбоев.

6) В зависимости от причин отказы согласно ГОСТ 27.002-89 делятся на следующие виды:

а) конструкционные отказы (происходят из-за недостатков конструкции отказавшей техники);

б) технологические отказы (вследствие нарушения технологии изготовления отказавшего изделия);

в) эксплуатационные отказы (происходят из-за нарушения правил эксплуатации отказавшей техники).

### 7) Ресурсные отказы – это те, из-за которых заканчивается ресурс изделия.

При таких отказах данный технический объект списывается или ставится на капитальный ремонт.

8) Деградационные отказы – это такие, которые происходят вследствие неизбежного старения техники при полном соблюдении всех норм и правил её создания и эксплуатации.

При проектировании техники (например, машин и аппаратов) следует указывать её возможные отказы (хотя бы основные).

При этом по тяжести последствий все отказы делятся на легкие, средние и тяжёлые.

Данная терминология связана с величиной ущерба от отказа по сравнению со стоимостью отказавшего изделия.

При лёгких отказах ущерб от них много меньше стоимости отказавшего изделия, при средних отказах – сравним с ней, при тяжёлых отказах – много больше стоимости изделия.

Кроме данной в ГОСТ 27.002-89 обязательной классификации отказов в технической литературе и на практике встречаются и другие названия видов отказов.

1) Так, в книге проф. А.С.Проникова «Надежность машин»[1] все отказы техники делятся на функциональные и параметрические.

*Функциональные отказы* это такие, в результате которых техника полностью теряет способность выполнять свои функции (например, полная остановка токарного станка из-за поломки его основных деталей).

*Параметрические отказы* – такие, при которых техника как-то может выполнять свои функции после отказа, но какие-то параметры, характеризующие качество её работы, выходят за допустимые пределы. Например, это выработка брака на сильно изношенном токарном станке (это отказ по параметрам точности изготовления деталей).

2) В зависимости от того, на какой стадии эксплуатации происходят отказы техники, они делятся на следующие виды:

- *Прирабочные отказы* – это отказы, происходящие на стадии приработки – 1-й стадии эксплуатации техники (например, оборудования). Отказы на данной стадии в основном идут из-за каких-либо скрытых дефектов в новой технике (например, из-за литейных раковин в отливках, ошибок конструкторов, погрешностей обработки на станках и др.). Первую стадию эксплуатации иногда называют также стадией «выжигания» скрытых дефектов. Она отличается большой индивидуальностью и отсюда плохой предсказуемостью по отказам.

- После прохождения всех прирабочных отказов или после устранения их причин наступает 2-я стадия эксплуатации – *стадия нормальной эксплуатации исправной новой техники*. Здесь отказы идут из-за случайно возникающих непроектных условий эксплуатации, на которые техника не рассчитана (из-за внезапных перегрузок, перегревов, скачков напряжения в сети, ошибок рабочих, случайных колебаний качества сырья и т.д.). На данной стадии эксплуатации идут внезапные отказы.

В постоянных условиях работы частота возникновения таких случайных перегрузок тоже примерно постоянна, поэтому и частота отказов из-за них примерно постоянна.

В теории надежности, когда речь идет о работе группы одинаковых невосстанавливаемых после отказов изделий (например, подшипников качения), частота отказов обычно берётся в расчёте на одно оставшееся

работоспособное изделие в группе в данный момент времени. Такая частота отказов называется интенсивностью отказов  $\lambda$ .

По данным эксплуатации (испытаний) группы невосстанавливаемых изделий статистическая оценка величины  $\lambda \cong \lambda^*$  при данном  $t$  приближённо определяется по формуле:

$$\lambda \cong \lambda^* = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N_p} \left[ \frac{\text{отк}}{\text{час}} \right],$$

где  $\Delta n$  – количество отказов в группе за время  $\Delta t$ ;

$N_p$  – количество работоспособных изделий, оставшихся в группе к данному моменту времени  $t$ ;

$\frac{\Delta n}{\Delta t}$  - частота отказов в группе (приближённо) при данном  $t$ .

Наряду с величиной  $\lambda(t)$  частота отказов в группе одинаковых невосстанавливаемых изделий берётся иногда в расчете на одно исходное испытываемое изделие, это величина  $f(t)$ . Её статистическая оценка  $f^*$  при каждом  $t$  приближённо определяется по соотношению:

$$f \cong f^* = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N} \left[ \frac{\text{отк}}{\text{час}} \right],$$

где  $N$ - исходное число используемых (эксплуатируемых) изделий в группе.

Можно показать, что величина  $f(t)$  совпадает с одной из функций распределения случайной величины  $T$  – срок службы до отказа изделий в рассматриваемой группе. В теории вероятности функция  $f(t)$  называется функцией плотности вероятности случайной величины  $T$ . В технике, в том числе в теории надежности,  $f(t)$  часто называется также функцией плотности расположения на оси времени  $t$  реализаций  $T_i$  случайной величины  $T$  по данным испытаний(эксплуатации) - см. например, рис.2.1.

Возвращаясь к характеристике  $\lambda(t)$ , отметим, что на второй стадии эксплуатации величина  $\lambda(t) \cong \text{const}$  (по указанным выше причинам).

- По мере старения техники из-за износа, коррозии и т.д. сопротивляемость её случайным перегрузкам снижается, и величина  $\lambda$  начинает расти. Начинается 3-я стадия эксплуатации – *стадия износных (постепенных) отказов* – их предпосылки развиваются постепенно. Покажем график изменения интенсивности отказов  $\lambda(t)$  по всем трём стадиям эксплуатации техники.

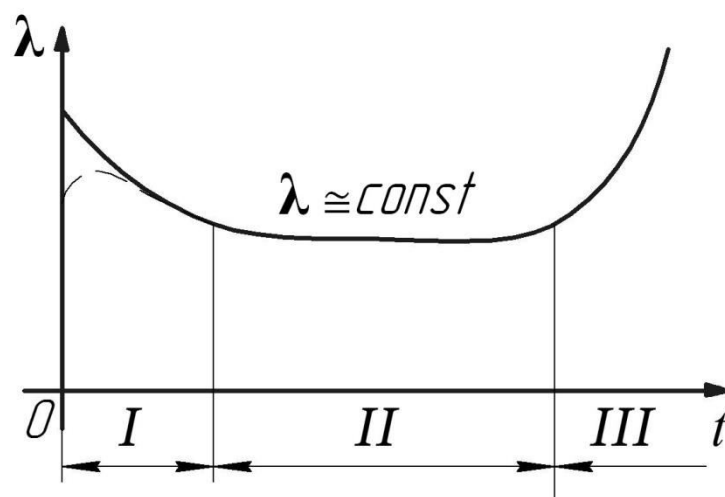


Рис. 2.2. Стадии эксплуатации техники

3) Отказы на разных стадиях эксплуатации нередко сопоставляют с болезнями человека в зависимости от его возраста. Так, приработочные отказы сопоставляют с детскими болезнями человека, внезапные отказы на 2-й стадии эксплуатации — со случайными болезнями взрослого здорового организма, износосвые отказы на 3-й стадии — со старческими болезнями человека.

4) Профессором Прониковым А.С. предложен также термин «потенциальные» отказы техники для тех отказов, которые ещё не произошли, но уже ожидаются (назревают). Этот термин полезен, например, при проведении планово-предупредительного ремонта (ППР), который направлен, в основном, на предупреждение таких назревающих отказов.

### 2.6.3. Методы устранения отказов и их последствий

Все причины отказов техники (например, машин, аппаратов, их элементов) можно разделить на случайные и систематические причины.

К систематическим причинам отказов относятся прежде всего закономерные процессы старения техники (износ, коррозия, усталостные явления, коробление и др.).

К случайным причинам отказов относятся скрытые дефекты в новой технике, случайные перегрузки техники при работе, случайные колебания качества используемого сырья и т.д.

Отказы оборудования могут происходить:

- из-за повреждений его элементов;

- без повреждений элементов оборудования, например, из-за ослабления крепежа, разрегулировок механизмов, заклинивания деталей, засорения механизмов, отверстий и т.д.

Соответственно, устранение или предупреждение отказов оборудования(и их последствий) достигается следующим образом:

- заменой повреждённых (в том числе отказавших или изношенных элементов оборудования (его узлов, деталей) на запасные (новые или восстановленные)).

Здесь ремонт самих деталей и узлов не производится. Производится ремонт машины или аппарата в целом методом замены повреждённых (отказавших или изношенных) деталей и узлов на запасные. Это наиболее простой и самый распространённый вид ремонта машин и аппаратов;

- восстановительной обработкой отказавших или изношенных деталей и узлов машин и аппаратов, т. е. ремонтом самих повреждённых элементов оборудования или сочетанием такой обработки с заменой повреждённых деталей и узлов на запасные (например, несколько ремонтов изношенной детали и потом её замена на запчасть);

- без ремонта как деталей и узлов оборудования, так и самих машин и аппаратов в целом.

Например, подтяжкой крепежа, подрегулировкой и прочисткой механизмов, устранением заклинивания деталей, промывкой и прочисткой механизмов, отверстий, магистралей и т.д. (указанные операции по п.3 относятся к техническому обслуживанию (ТО) оборудования).

#### **2.6.4. Некоторые характерные отказы машин и аппаратов.**

##### **Закономерности распределения отказов**

##### ***Внезапные отказы машин и аппаратов***

Характерным примером внезапных отказов оборудования предприятий являются поломки деталей и узлов из-за случайных перегрузок (чаще на 2-й стадии эксплуатации).

На графике (рис. 2.3) приведено возможное изменение случайной нагрузки на деталь машины во времени на фоне постоянной несущей способности детали (её прочности).

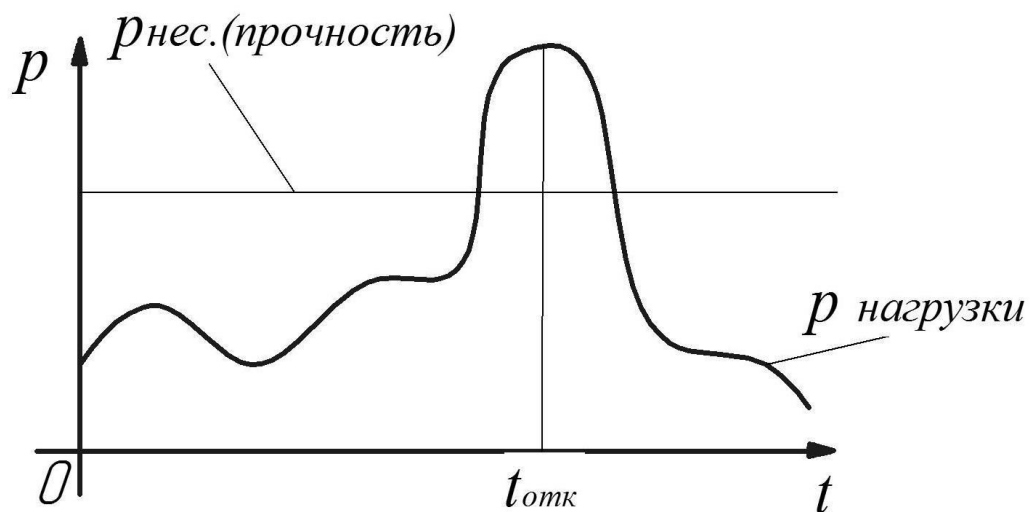


Рис. 2.3. Изменение случайной нагрузки на деталь на фоне прочности детали

В наиболее простом случае поломка детали произойдёт, когда пик случайной нагрузки превысит прочность детали.

Возможны также случаи, когда в составе какого-либо работающего узла нагрузка, воспринимаемая узлом, приходится поочередно на различные элементы (детали) узла, тогда несущая способность этого узла будет во времени переменной. Например, при работе зубчатой передачи в зацеплении поочередно находятся различные пары зубьев. Из-за случайного разброса прочности даже одинаковых зубьев несущая способность зубчатой передачи во времени будет в определённой степени переменной. Тогда рис. 2.3 примет вид, показанный на рис. 2.4.

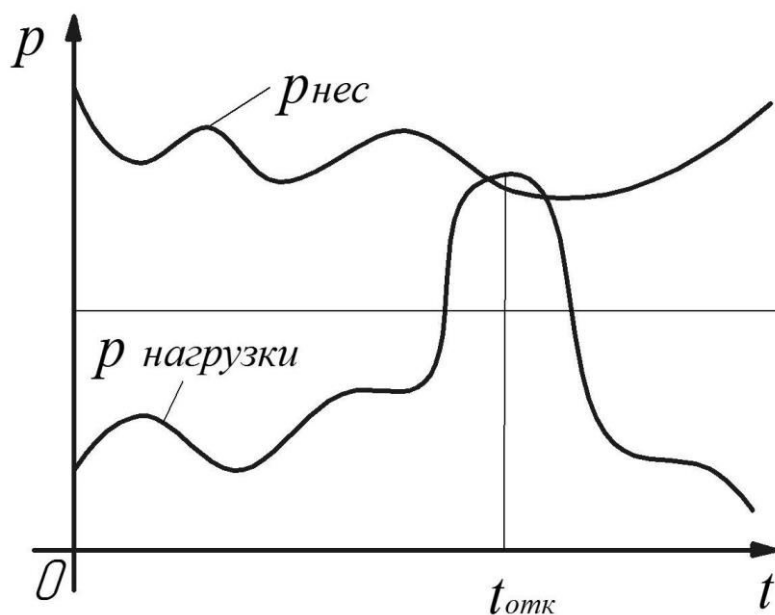


Рис. 2.4. Изменение случайной нагрузки на зубчатую передачу на фоне переменной несущей способности передачи

В этом случае поломка зуба может произойти в момент времени  $t=t_{\text{отк.}}$ , когда пик случайной нагрузки на передачу совпадает с нахождением в зацеплении самой «слабой» пары зубьев. Этот пик нагрузки будет также иметь место, когда, например, в зацеплении находятся и вершины зубьев соседних колес (при этом величины изгибающего момента в основаниях зубьев, находящихся в зацеплении, максимальные, а общая нагрузка на передачу в этот момент случайно возрастает, например, из-за случайного заклинивания каких-либо деталей и т.д.).

Выше было сказано, что внезапные отказы в основном идут на 2-й стадии эксплуатации техники (например, машин и аппаратов). При этом в группах одинаковых невосстанавливаемых элементов (подшипников, зубчатых передач и др.) интенсивность отказов  $\lambda$  на 2-й стадии эксплуатации обычно постоянна (см. выше):

$$\lambda = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N_p} \left[ \frac{\text{отк}}{\text{час}} \right] \cong \text{const}$$

С другой стороны, в такой группе изделий надежность также характеризуется вероятностью безотказной работы  $P(t)$ , которая по данным эксплуатации (испытаний на надежность) равна:

$$P(t) \cong \frac{N_p(t)}{N},$$

где  $P(t)$  принимается равной доле оставшихся работоспособными изделий в этой группе к моменту времени  $t$ .

Когда  $\lambda = \text{const}$ , то можно показать, что

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{и} \quad N_p(t) = N \cdot e^{-\lambda t}$$

на 2-й стадии эксплуатации ( $t = 0$  в начале 2-й стадии) – см. рис.2.5[2].

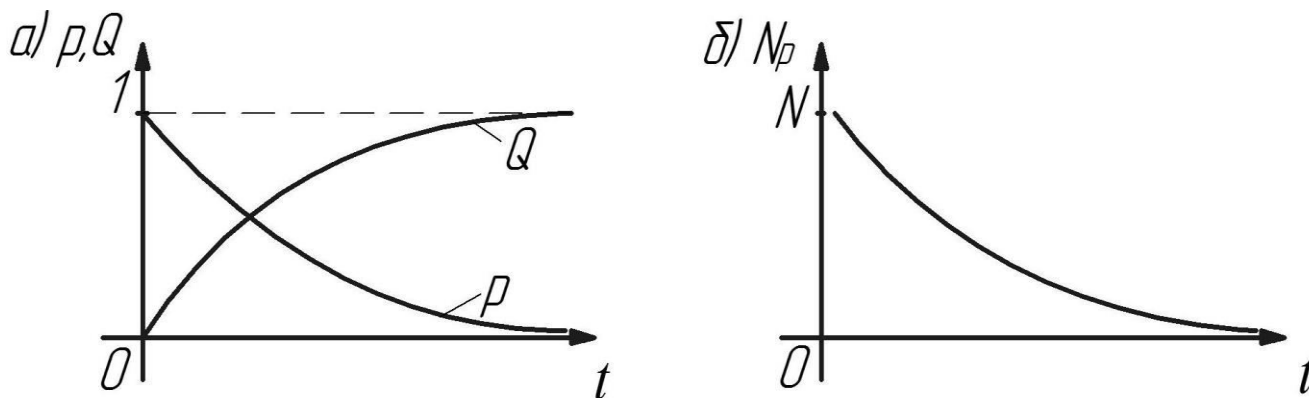


Рис. 2.5. Зависимости  $P$ ,  $Q$ ,  $N_p$  от времени эксплуатации на 2-й стадии

Здесь  $Q(t) = \frac{n(t)}{N}$  – вероятность отказа на 2-й стадии,

$n(t)$ - число отказов в группе изделий.

Так как рассматривается группа невосстанавливаемых изделий, то число отказавших изделий  $n(t)$  в сумме с числом оставшихся работоспособными изделиями  $N_p(t)$  при этих же  $t$  всё время равно исходному числу  $N$  испытуемых изделий в группе:

$$n(t) + N_p(t) = N.$$

Отсюда можно также показать, что

$$P(t) + Q(t) = 1 \text{ (при любом } t\text{).}$$

Так как на 2-й стадии эксплуатации соблюдается зависимость

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

т.е. вероятность безотказной работы меняется по закону экспоненты, то говорят, что здесь соблюдается экспоненциальный закон надежности.

По данным эксплуатации или испытаний на надежность часто можно проверить, соблюдался ли экспоненциальный закон надежности, и если он соблюдался, то определить, с какой интенсивностью  $\lambda$  шли отказы. Для такой же техники, работающей в тех же условиях, на будущее также можно ожидать соблюдения экспоненциального закона надежности с этой же интенсивностью отказов  $\lambda$ . Поэтому можно прогнозировать вероятный ход отказов на будущее и отсюда потребность в запасных изделиях для замены отказавших изделий - потребность в запчастях при экспоненциальном законе надежности [5].

При таком подходе учитываются особенности эксплуатации техники на данном конкретном производстве.

### ***Постепенные отказы машин и аппаратов***

Выше было сказано, что речь о внезапных отказах идёт в основном на 2-й стадии эксплуатации техники (стадии нормальной эксплуатации новых исправных изделий).

По её окончании вследствие износа техники (из-за старения техники) снижается её сопротивляемость случайным перегрузкам, и частота отказов (интенсивность отказов  $\lambda$ ) техники начинает расти. Начинается 3-я стадия эксплуатации – стадия износных (постепенных) отказов.



Предпосылки таких отказов развиваются постепенно, например, в зубчатых передачах из-за износа боковых поверхностей зубьев зубчатых колёс, износа тел качения и беговых дорожек в подшипниках качения, износа ползунов в направляющих станков, лезвий шаберов валов на БДМ и др.

В постоянных условиях эксплуатации ход износа в парах трущихся деталей описывается зависимостью:

$$X_{\text{изн}} = i \cdot t_{\text{изн}} [\text{мм}, \text{г}], \quad (2.1)$$

где  $X_{\text{изн}}$  - результат износа (уменьшение поперечного размера, массы детали);

$t_{\text{изн}}$  - время износа;

$i$  - скорость износа (мм/ч, г/ч).

В постоянных условиях работы скорость износа детали тоже примерно постоянна. Однако, даже в группах одинаковых пар трущихся деталей всегда есть некоторый разброс скорости износа относительно её средней величины, например, из-за колебаний свойств материала деталей, режима смазки, параметров окружающей среды (влажности, температуры) и т.д.

Чаще всего разброс значений скорости износа  $i$  подчиняется нормальному закону, т. е. в группе одинаковых сопряжений есть какое-то среднее значение скорости износа  $i_{\text{ср}}$  и вокруг него примерно симметричное в обе стороны рассеяние скорости износа. При нанесении по данным эксплуатации (испытаний) этого разброса на числовую ось  $i$  получаем (рис 2.6):

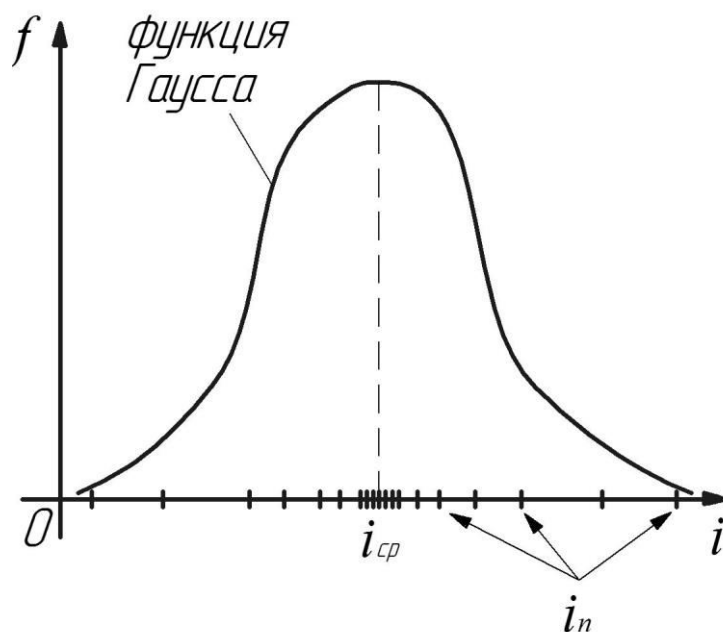


Рис. 2.6. Функция Гаусса для случайной величины  $I$  (скорость износа)

Тогда для случайной величины  $I$  – скорость износа - её функция распределения  $f$  (плотность вероятности) имеет вид функции Гаусса, показанный на этом рисунке. В теории надежности  $f$  чаще называют функцией плотности расположения реализаций случайной величины  $I$  на её числовой оси.

По зависимости (2.1) допустимое время работы пар трущихся деталей равно

$$t_{\text{изн.доп}} = \frac{x_{\text{изн.доп}}}{i}, \quad (2.2)$$

где  $x_{\text{изн.доп}}$  - допустимая величина износа;

$i$  - скорость износа.

Чтобы не допустить аварии (поломки зуба), когда износ зуба достигнет предельно допустимой величины, рабочее колесо в передаче заменяют на запасное.

Так как в равенство (2.2) входит случайная величина  $i$  (а  $x_{\text{изн.доп}} = \text{const}$ ), то  $t_{\text{изн.доп}}$  тоже является случайной величиной. При этом, если скорость износа  $i$  подчиняется нормальному распределению, то можно показать, что за время работы величина  $t_{\text{изн}} = T$  (срок службы колеса как случайная величина) тоже подчиняется нормальному закону.

По данным эксплуатации для  $T = t_{\text{изн}}$  тоже можно построить график функции  $f$  как и для случайной величины  $I$ , также имеющий вид функции Гаусса.

Если установлено, что на 3-й стадии эксплуатации техники случайная величина  $T$  – срок службы до отказа подчиняется нормальному распределению, то говорят, что на этой стадии эксплуатации имеет место нормальный закон надежности.

Это возможно тогда, когда для случайной величины  $T$  – срок службы до отказа выполняются следующие условия, известные из теории вероятности:

1) на случайную величину  $T$  действует большое количество факторов, отклоняющих её от среднего значения  $T_{\text{ср}}$  в обе стороны;

2) все эти факторы примерно одинаково мало влияют на случайную величину  $T$  (при таких условиях любая случайная величина подчиняется нормальному закону – см. центральную предельную теорему в теории вероятности).

Если среди факторов, отклоняющих случайную величину  $T$  от её среднего значения, есть один или группа, влияющих на неё сильнее остальных факторов, то вид нормального распределения функции  $f$

искажается (смещается положение максимума  $f$ , теряется симметричность графика  $f$ ).

Например, если в случае группы одинаковых зубчатых передач был плохо проведён их монтаж (например, были неправильно выставлены боковые зазоры в зацеплениях), нарушается режим смазки и др., то средний срок службы таких передач (напр., до поломки зубьев) уменьшается, соответственно максимум функции  $f$  на стадии 3 эксплуатации смещается влево и вид графика  $f$  на этой стадии теряет симметричность.

Также и на 2-й стадии эксплуатации, если здесь наряду со случайными перегрузками на ход отказов уже сильно влияет износ, то на этой стадии нарушается экспоненциальный закон надежности.

Во всех таких случаях для описания хода отказов используют более универсальный закон надежности Вейбулла (Вейбулл – шведский ученый, профессор Стокгольмского университета).

Согласно этому закону выражение для вероятности безотказной работы  $P(t)$  имеет вид:

$$P(t) = e^{-t^m/t_0},$$

где  $m$  и  $t_0$  - параметры закона Вейбулла;

$m > 0$  - параметр формы;

$t_0 > 0$  - параметр масштаба.

Можно показать, что закон Вейбулла в качестве частных случаев даёт экспоненциальный закон надежности (при  $m=1$ ) и нормальный закон надежности (при  $m=3,3$ ).

Всё вышесказанное о закономерностях надежности относится к ходу отказов в группах одинаковых невосстанавливаемых изделий. Однако, большинство технических объектов после отказов ремонтируется. Материал по надежности, изложенный выше для невосстанавливаемых изделий, относится также и к первым отказам восстанавливаемых (ремонтируемых) изделий (так как на ход этих отказов наличие или отсутствие ремонта после них не влияет).

Изложенные выше три закона надежности (экспоненциальный - для 2-й стадии эксплуатации, нормальный - для 3-й стадии эксплуатации и закон Вейбулла (для обеих этих стадий) наиболее часто встречаются на практике. Для каждого из них есть методы прогнозирования вероятного хода отказов на будущее и отсюда возможность прогнозирования потребности в запчастях, например, при отказах оборудования[5].

Кроме указанных, на практике иногда встречаются и другие закономерности, например, усечённый нормальный закон надежности, логарифмически нормальный закон надежности,  $\Gamma$ (гамма) – распределение случайной величины  $T$  – срока службы до отказов и другие.

### **3.ПРЕДМЕТ НАУКИ О НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ. ЕЁ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ**

Наука о надежности техники использует данные многих других смежных областей технических знаний (например, наук об износе, коррозии, усталостных явлениях и др.).

Однако, наука о надежности имеет и собственный предмет изучения. Он заключается в изучении изменения исходного качества техники при её использовании, возможностей управления этим изменением качества и др. С этой целью изучаются, например, распределения хода отказов во времени в группах одинаковых технических объектов (изделий), причины этих отказов, методы устранения и предупреждения отказов и их последствий, влияние на надежность сложных технических систем надежности элементов этих систем и т.д.

В науке о надежности техники разработан также широкий круг собственных понятий и показателей надежности (см. главу 5).

### **4.НАДЕЖНОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В начале изучения надежности оборудования ЦБП необходимо, прежде всего, ознакомиться с правильной трактовкой современной терминологии надежности применительно к этому оборудованию, а также дать общее представление об особенностях надежности основного оборудования ЦБП.

На этой основе более подробная конкретная характеристика надежности всего разнообразия машин и аппаратов ЦБП может быть дана в соответствующих спецкурсах по оборудованию.

В технологических линиях предприятий ЦБП (и в целом в химической промышленности) используется разнообразное (в основном технологическое) оборудование.

Так, в составе одной технологической линии на предприятии ЦБП может использоваться до 600 и более различных видов и типоразмеров машин и аппаратов.

Ввиду того, что указанное оборудование практически всё работает в непрерывном режиме в составе единых технологических линий, в требованиях к обеспечению его надежности имеется много общего. Так, на первый план здесь выдвигается обеспечение высоких безотказности и ремонтпригодности используемых машин и аппаратов. Действительно, улучшение безотказности уменьшает количество аварийных остановов каждой единицы оборудования, а повышение ремонтпригодности снижает продолжительность таких остановов. То и другое вместе повышает степень технического использования оборудования (повышает время эффективной работы технологических линий и

сокращает экономические потери предприятия из-за невыпуска товарной продукции при этих остановах).

Аналогично улучшение безотказности и ремонтпригодности даёт значительный экономический эффект и при проведении плановых ремонтов (ППР).

С другой стороны, ввиду большого разнообразия установленного оборудования конкретные методы обеспечения его надежной, безотказной работы также весьма разнообразны.

В ЦБП при обеспечении надежной работы всего производства наибольшую сложность представляет обеспечение надежности головных агрегатов технологических линий предприятий - бумагоделательных и родственных им картоноделательных и сушильных машин. Поэтому изучению и обеспечению надежности таких машин в ЦБП и её отраслевом машиностроении уделяется наибольшее внимание и ознакомление со спецификой основных понятий надежности на примере этого оборудования наиболее показательны.

К основному оборудованию предприятий ЦБП наряду с БДМ относится и целлюлозное оборудование, имеющее свою специфику надежности, отличную от БДМ, поэтому при первоначальном ознакомлении с надежностью машин и аппаратов ЦБП следует дать общие сведения по надежности и этого оборудования.

#### **4.1. Надежность бумагоделательных машин**

Классификация промышленных изделий с точки зрения надежности дана в ГОСТ 16.503-70 «Промышленные изделия. Перечень и характеристики их основных показателей надежности». С точки зрения этого ГОСТа о бумагоделательных машинах (БДМ) можно сказать следующее:

1) по возможностям предотвращения и устранения отказов - эти машины являются восстанавливаемыми и ремонтируемыми изделиями;

2) по последствиям отказов - отказы БДМ (на БДМ) приводят, в основном, к невыполнению машиной своих функций или к ухудшению выполнения этих функций;

3) по режиму работы и степени использования БДМ – это машины, работающие в непрерывном режиме и с остановами на ремонты различных видов – планово-предупредительные (ППР) и неплановые послеаварийные ремонты.

БДМ используются до наступления их предельного состояния; рациональная постановка ремонта и в целом эксплуатации, а также эффективные модернизации этих машин могут значительно отодвинуть наступление их предельного состояния;

4) по характеру изготовления БДМ – это машины, которые проектируются и изготавливаются индивидуально, в единичных экземплярах. Учитывая также

индивидуальность модернизаций БДМ и большое разнообразие вырабатываемой на них продукции, можно сказать, что из примерно десяти тысяч эксплуатируемых на сегодня в мире БКСМ вряд ли найдутся какие-либо две машины, полностью одинаковые как по конструкции, так и по режиму работы;

5) по функциональной структуре БДМ – это машины с элементами резервирования и с некоторой функциональной избыточностью (см.ниже);

б) по характеру эксплуатации и ремонта – эти машины эксплуатируются с применением системы технического обслуживания и ремонта.

## **4.2. Основные понятия и термины надежности в применении к БДМ**

К наиболее важным понятиям надежности применительно к БДМ относятся следующие.

### **4.2.1. Работоспособность и исправность БДМ**

С учётом общего определения работоспособного состояния техники, а также практики его обеспечения применительно к БДМ об обеспечении работоспособности этих машин можно сказать следующее.

Работоспособное состояние БДМ - это такое, при котором машина может выполнять все свои функции с сохранением всех требуемых характеристик как своих, так и выпускаемой продукции, в необходимых пределах.

Все указанные характеристики (их перечень, требуемые численные значения, допустимые пределы изменений) содержатся в следующей технической документации на БДМ и выпускаемую продукцию:

а) проектная документация на машину (технический и рабочий проекты БДМ, включая чертежи и другую документацию, техническое задание на проектирование машины (от заказчика), эскизный проект и др.);

б) отраслевые стандарты (ОСТы) на унифицированные в России узлы БДМ;

в) инструкции на монтаж, пуск, наладку, эксплуатацию БДМ;

г) положение о системе технического обслуживания и ремонта (СТОиР) оборудования ЦБП в части БКСМ;

д) требования к качеству выпускаемой на данной БДМ продукции (содержатся в соответствующих ГОСТах и технических условиях (ТУ) на эту продукцию).

В указанной документации содержатся требования к следующим параметрам БДМ и выпускаемой продукции:

1) параметры технологического режима машины:

например, её рабочая скорость, параметры подаваемой на машину бумажной массы, параметры технологического режима основных частей БДМ и т.д.;

2) параметры конструкции БДМ;

3) требования к точности выверки элементов конструкции БДМ при монтаже;

4) параметры, характеризующие требуемое качество ТО и ремонта, и т.д. Аналогично регламентируется требуемая экономическая эффективность работы БДМ.

Постоянное обеспечение работоспособного состояния БДМ при эксплуатации - это первая по важности и сложности задача при обеспечении надежной работы этих машин. Работоспособное состояние БДМ обеспечивается всеми эксплуатационными службами предприятия ЦБП.

От работоспособного состояния машины отличается её исправное состояние, при котором машина соответствует всем требованиям технической документации на неё (прежде всего чертежам), но может требовать дополнительной доводки, наладки, смазки и др.

#### **4.2.2. Надежность БДМ**

В общем определении надежности техники применительно к БДМ можно отметить следующее.

Полная характеристика надежности БДМ дается в виде ряда комплексов показателей надежности, относящихся как к БДМ в целом, так и к элементам конструкции машины.

Так, свои сроки службы имеют как машина в целом, так и все её узлы и детали. Это же относится к наработкам на отказ машины в целом и её элементов, к затратам времени и средств на ремонт машины и отдельных её элементов и т.д.

#### **4.2.3. Простые свойства надежности БДМ**

##### ***Безотказность БДМ***

Также, как было указано выше для оборудования ЦБП в целом, для БДМ можно отметить следующее.

С учетом непрерывного режима работы и больших экономических потерь при простоях этих машин из-за невыпуска продукции при отказах безотказность БДМ – это первое по важности из всех её простых свойств надежности.

Безотказность БДМ, как и её надежность в целом, обеспечивается при создании машины (т.е. при проектировании и изготовлении) и при эксплуатации. Это простое свойство надежности машины при её создании обеспечивается, например, использованием апробированных высоконадёжных конструктивных решений и такой же современной технологии изготовления БДМ.

При эксплуатации БДМ необходимо периодически (при ревизиях) и непрерывно (средствами технической диагностики и органолептически) контролировать техническое состояние машины. По данным такого контроля проводятся ППР (как простой заменой изношенных и отказавших элементов конструкции на запасные, новые или восстановленные, так и восстановительной обработкой этих элементов и, кроме того, сочетанием восстановительной обработки с заменой). Всё это направлено на предупреждение возможных отказов изношенных элементов конструкции и устранение произошедших отказов.

Кроме того, на безотказность БДМ сильно влияют как качество её технического обслуживания (смазка, подтяжка крепежа, прочистка отверстий перфорации, промывка сеток и сукон и др.), так и поддержание заданного технологического режима работы машины. Например, отказами машины являются её остановки из-за обрывов бумажного полотна, и эта обрывность зависит от соблюдения технологического режима работы БДМ.

Количественно безотказность БДМ в целом характеризуется, например, числом аварийных остановов машины в год (и другими показателями).

### ***Ремонтопригодность БДМ***

С точки зрения обеспечения максимально непрерывной работы машины и уменьшения экономических потерь от невыпуска продукции из-за аварийных простоев ремонтпригодность – это второе по важности из всех простых свойств надежности БДМ.

Если улучшение безотказности направлено на уменьшение количества аварийных остановов машины, например, за год, то улучшение ремонтпригодности позволяет уменьшать продолжительность таких остановов. То и другое вместе повышает степень технического использования БДМ (например, повышает время эффективной работы машины в сутки, в год) и уменьшает экономические потери предприятия ЦБП от аварийных простоев БДМ.

Ремонтопригодность конструкции БДМ в целом улучшается, например, блочным построением её конструкции. Это означает, что конструкция машины построена из отдельных блоков, которые можно независимо друг от друга снимать с БДМ, либо ставить на неё.

Блочное построение конструкции улучшает, например, возможность применения блочного (узлового) ремонта БДМ. При таком методе ремонт узла (например, вала бумагоделательной машины при отказе подшипника) производится не на остановленной машине, для ремонта вал в целом (с подшипниками) снимается с остановленной БДМ и отвозится в ремонтно-механический цех (РМЦ). На место снятого узла ставится запасной вал, и машина снова запускается в работу. Тем самым значительно сокращаются простои БДМ на аварийный ремонт, так же как и экономические потери предприятия от невыпуска продукции из-за этих простоев.



Количественно ремонтпригодность БДМ в целом характеризуется, например, средней продолжительностью аварийных остановов машины за год.

#### ***Долговечность БДМ***

Долговечность БДМ важна прежде всего с экономических позиций. Действительно, БДМ, как и любое другое оборудование, должна проработать достаточно долго, чтобы окупились затраты на её приобретение, и затем была получена необходимая прибыль.

Долговечность БДМ на стадии создания машины может быть обеспечена примерно теми же методами, что и при обеспечении ее безотказности (см. с. 30). При эксплуатации срок службы машины может быть продлён за счет обоснованных модернизаций и рациональной постановки эксплуатации и ремонта.

Долговечность БДМ количественно характеризуется в основном сроком ее службы. В свое время в ЦНИИбуммаше проектировали эти машины на срок службы 25 лет. Фактически БДМ служат по 50 лет и более (за счёт указанных выше мер по модернизации машин и рациональной постановки их ремонта и в целом эксплуатации).

#### ***Сохраняемость надежности БДМ***

Это простое свойство надежности относится в основном к отдельным элементам конструкции БДМ (их узлам, деталям) при хранении на складе, транспортировке с заводов-изготовителей на предприятия ЦБП и др., поэтому о нём речь пойдёт далее.

### **4.2.4. Простые свойства надежности элементов БДМ**

Основные элементы конструкции БДМ, начиная от узлов и деталей и вплоть до основных частей машины и ее вспомогательных систем, имеют свои собственные характеристики надежности (сроки службы, наработки на отказ, время и трудоёмкость ремонтов и т.д.). Поэтому можно говорить о простых свойствах надежности элементов конструкции БДМ (их безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости надежности).

По важности с точки зрения экономики и обеспечения непрерывного режима работы простые свойства надежности элементов БДМ можно расположить в том же порядке, что и для БДМ в целом.

#### ***Безотказность элементов БДМ***

Эта безотказность обеспечивается:

а) при создании конструкции (при проектировании и изготовлении), например, с использованием высоконадёжных материалов (износо- и коррозионностойких, долговечных), с уменьшением нагрузок на элементы конструкции, в том числе динамических нагрузок от сил инерции, с упрощением конструкции элементов машины;

б) выбором передовой технологии изготовления;

в) при эксплуатации безотказность элементов БДМ обеспечивается строгим соблюдением требований СТО и Р (в отношении, например, своевременной замены изношенных, а также отказавших элементов конструкции на запасные).

Показатели безотказности элементов конструкции БДМ зависят от того, восстанавливаемые это элементы или нет. Большинство элементов конструкции БДМ (их узлы и детали) - это невосстанавливаемые изделия, они при износе и отказах не ремонтируются, а заменяются на запасные. Лишь сравнительно небольшая часть узлов и деталей БДМ при износе и отказах подвергаются восстановительной обработке [4]. Наконец, применяется сочетание такой восстановительной обработки с заменой (например, обрезиненные прессы валы по мере износа обрезаются несколько раз подвергаются перешлифовке и затем заменяются на запасные).

У невосстанавливаемых элементов конструкции БДМ (подшипники, лезвия шаберов и др.) безотказность характеризуется их сроками службы. У восстанавливаемых элементов (например, валы прессы, каландров) безотказность характеризуется сроками службы (наработками) между восстановительными обработками (например, перешлифовками валов) и сроками службы (наработками) между заменами валов на запасные;

#### ***Ремонтопригодность элементов БДМ***

Ремонтопригодность узлов машины, ремонтируемых простой заменой, улучшается, например, внедрением конструкций, допускающих замену элементов без остановки машины (например, гидропланок), улучшением легкосъемности узлов, требующих при их замене остановки БДМ, внедрением устройств для механизации трудоёмких операций при заменах элементов БДМ.

При ремонте таких узлов их ремонтопригодность количественно характеризуется временем и трудоёмкостью демонтажа узла с машины (например, для блочного ремонта) и обратного монтажа на машину. При ремонте элементов конструкции БДМ их восстановительной обработкой в РМЦ ремонтопригодность таких элементов характеризуется также затратами времени, стоимостью и трудоёмкостью такой восстановительной обработки.

#### ***Долговечность элементов БДМ***

Она в основном характеризуется сроками службы (ресурсами) элементов конструкции.

Выше было сказано, что у невосстанавливаемых элементов конструкции БДМ их сроки службы помимо долговечности характеризуют и безотказность таких элементов. Поэтому здесь совпадают и методы обеспечения безотказности (см. с. 32) и долговечности.

У восстанавливаемых элементов конструкции методы обеспечения долговечности примерно такие же.

#### ***Сохраняемость надежности элементов БДМ***

Это простое свойство надежности элементов конструкции важно при их хранении (в качестве запчастей, перед монтажом и др.), при транспортировке (с

заводов-изготовителей на предприятия ЦБП), при дежурстве в качестве резервного оборудования (например, в случае резервных насосов).

Для улучшения в целом сохраняемости оборудования при хранении прежде всего используют консервационную смазку. При хранении конкретных узлов и деталей могут применяться также специальные меры по улучшению сохраняемости.

Так, при хранении валов БДМ в подшипниках качения необходимо периодическое проворачивание валов во избежание появления вмятин от тел качения на беговых дорожках колец.

При хранении обрезиненных прессовых валов необходимо избегать попадания прямого солнечного света на резиновку во избежание её ороговения и др.

Количественной характеристикой свойства сохраняемости при хранении запчастей на складе является, например, допустимый срок хранения данного узла (детали) в данных условиях.

#### **4.2.5. Резервирование на БДМ**

Как было отмечено выше (с. 29), БДМ - это машины с элементами резервирования различных видов.

#### **Примеры структурного резервирования на БДМ**

1) При проектировании после определения необходимых количеств обезвоживающих элементов в различных частях БДМ (гидропланок, отсасывающих ящиков, прессов, сушильных цилиндров и др.) часто в запас обезвоживания добавляется некоторое количество резервных обезвоживающих элементов (например, 1-2 отсасывающих ящика и сушильных цилиндров). Это является примером нагруженного структурного резервирования, так как указанные резервные узлы работают всё время одновременно с основными узлами.

2) Примером ненагруженного структурного резервирования можно (несколько условно) считать наличие неснижаемого запаса запчастей на складе (так как запчасти используются лишь при отказе (износе) основных элементов конструкции БДМ и вместо них). Это одновременно является примером резервирования замещением.

3) Группы одинаковых узлов на машине (например, подшипников качения) имеют резерв (запчасти на складе) также в виде групп таких же узлов. При отказе любого из основных узлов он заменяется на любой из резерва. Таким образом, в данном случае имеем пример скользящего структурного резервирования.

#### **Примеры нагрузочного резервирования на БДМ**

1) Характерным примером такого резервирования является обычное при проектировании машин превышение прочности основных элементов конструкции над минимально необходимой прочностью этих элементов для нормальной работы машины (см. курс "Детали машин"- коэффициенты запаса прочности).

2) Другим примером нагрузочного резервирования является обычно закладываемое в проекты БДМ превышение на 15-30 % максимальной скорости привода над максимальной рабочей скоростью машины. Также и проектная мощность привода БДМ обычно предусматривается несколько завышенной по сравнению с ожидаемой максимально потребляемой мощностью привода при работе машины.

Указанное превышение проектных характеристик привода БДМ над их ожидаемыми при работе закладывается в проекты для расширения возможностей модернизации машин при эксплуатации.

### **Функциональное резервирование на БДМ**

Примером данного вида резервирования является то, что если при эксплуатации машины выявляется недостаточная обезвоживающая способность сеточной части, то она может быть, хотя бы частично, компенсирована за счёт завышенной (если это есть) обезвоживающей способности прессовой и даже сушильной части.

#### **4.2.6. Функциональная избыточность на БДМ**

Не все отказы на БДМ ведут к отказам машины в целом (это говорит о некоторой функциональной избыточности конструкции машины). Например, при отказе вентилятора в системе отвода и использования (рекуперации) тепла от сушильной части БДМ обычно продолжается выпуск кондиционной продукции, хотя и с несколько пониженным термическим КПД.

Аналогично при отказе привода дырчатых валиков в напорном ящике машина продолжает работу до ближайшего останова на ППР, хотя и с несколько пониженным качеством продукции и (или) производительностью.

При отказе одного из резервных сушильных цилиндров (отсасывающих ящиков и др.) отказа машины в целом также не происходит, но здесь имеет место отказ нагруженного резерва машины.

#### **4.2.7. Отказы БДМ (на БДМ)**

Отказы - одно из главных понятий надежности при эксплуатации БДМ. Уточняя данное выше общее определение отказа техники, можно также сказать,

что отказ БДМ - это вынужденное прекращение выработки машиной кондиционной продукции (бумаги требуемого качества).

Отказы машины могут произойти как из-за отказов ее конструкции (например, из-за поломок подшипников), так и из-за нарушений технологического процесса на исправной и работоспособной машине (например, из-за обрывов бумажного полотна при неправильной композиции подаваемой на машину бумажной массы).

На БДМ за все время её эксплуатации происходят отказы самых различных видов и по разнообразным причинам (см. данную выше общую систематизацию отказов техники и их причин, с. 15).

### ***Причины отказов на БДМ***

Одной из главных причин отказов БДМ является то, что на них наряду с основными технологическими процессами выработки бумаги (процессы отлива, прессования, сушки и т.д.) происходит ещё большое количество так называемых сопутствующих (или вторичных) процессов в элементах конструкции машины, в одежде (сетках, сукнах), в получаемом по ходу машины бумажном полотне. Такие процессы постоянно происходят в элементах БДМ при работе, они приводят к появлению различных изменений в этих элементах машины.

Некоторые из указанных изменений при устранении вызывающих их причин самоустраиваются (например, упругие деформации в металлоконструкциях); они исчезают, например, при остановках машины (за исключением упругих деформаций, вызываемых силой веса). Это обратимые изменения в элементах БДМ. Большинство же таких изменений остаются при прекращении действия вызывающих их причин (например, следы износа на деталях конструкции, их коррозия, усталостные явления в них, коробление тонкостенных отливок и др.). Это необратимые изменения в элементах БДМ.

Накапливаясь, такие необратимые изменения могут постепенно менять техническое состояние БДМ вплоть до её отказов. Указанные причины (изменения в элементах БДМ) относятся к числу систематических причин отказов.

Кроме этого многие отказы происходят под действием случайных причин, к которым относятся, например, случайные дефекты в новой машине, случайные перегрузки при работе БДМ, ошибки рабочих, колебания качества используемого сырья, полуфабрикатов.

Возвращаясь к систематическим причинам отказов, следует сказать, что если вторичные процессы приводят к обратимым изменениям в элементах БДМ, то сами эти вторичные процессы также называются обратимыми. Если же вторичные причины приводят к необратимым изменениям, то они сами называются необратимыми вторичными процессами.

Инженеры-механики, отвечающие за надежность машин (в том числе БДМ), должны хорошо знать влияние вторичных (сопутствующих) процессов на эту надежность и принимать необходимые меры по обеспечению надежности такого оборудования.

### ***Примеры вторичных процессов на БДМ***

К обратимым вторичным процессам на БДМ можно отнести следующие процессы:

**1). Упругие деформации** деталей и узлов БДМ под действием нагрузок, не превосходящих пределов упругости материалов, из которых изготовлены эти элементы конструкции (например, упругие прогибы валов, цилиндров, станин). Эти прогибы, в принципе, самоустраиваются при устранении вызывающих их нагрузок, иначе говоря упругие деформации элементов конструкции БДМ действительно являются обратимыми вторичными процессами.

Однако, в некоторых случаях упругие прогибы элементов конструкции приводят и к необратимым последствиям (например, циклические знакопеременные прогибы в цапфах валов и цилиндров со временем могут приводить к развитию усталостных явлений вплоть до поломок цапф).

#### ***2). Вибрации конструкций БДМ***

Они также представляют собой циклические упругие деформации. Вибрации конструкций на БДМ происходят, например, из-за неуравновешенности вращающихся валов и цилиндров, из-за износа подшипников и др.

#### ***3). Упругая вытяжка одежды машины (сеток, сукон)***

Например, на остановленном сеточном столе БДМ у натянутой сетки усилие натяжения постоянно по всей её длине, соответственно, вытяжка сетки также постоянна. При снятии усилия натяжения длина сетки должна восстанавливаться, это должна быть упругая вытяжка сетки.

На работающем сеточном столе натяжение сетки непостоянно по длине, так как в зонах трения сетки, прежде всего, на отсасывающих ящиках, а также на валах, происходят потери натяжения сетки. Максимальное натяжение - в набегающей ветви сетки (перед гауч-валом), минимальное - в сбегающей ветви (после гауча и сеткоповоротного валов). Поэтому на работающей машине натяжение сетки меняется по её длине циклически.

Наряду с этим при охвате сеткой валов, особенно приводных, наблюдаются деформации изгиба сетки, также меняющиеся циклически по её длине.

Соответственно, суммарные деформации и напряжения в сетке также меняются циклически.

Ранее на БДМ использовались бронзовые сетки, и их циклические деформации приводили к развитию усталостных явлений вплоть до обрывов сетки.

Современные синтетические сетки, устанавливаемые в сеточных частях, нечувствительны к знакопеременным нагрузкам. Их обрывы обычно являются следствием износа сеток, реже они происходят из-за схода сеток на сторону и по другим причинам.

**4). Упругая (обратимая) составляющая вытяжки бумажного полотна на БДМ** (как влажного, так и сухого)

Она имеет место в чистом виде (без пластической, необратимой составляющей вытяжки) при небольших рассогласованиях скорости между соседними приводными секциями машины.

**5). Умеренные тепловые деформации элементов конструкции БДМ**

Например, при подаче пара в сушильные цилиндры они нагреваются и при этом удлиняются вдоль оси. При прекращении нагрева цилиндры охлаждаются, их длина восстанавливается.

Это же справедливо, но в меньшей мере, для всех валов, балок, станин и других элементов конструкции БДМ, например при колебаниях температуры окружающей среды. Поэтому с приводной стороны машины подшипники в опорах валов и цилиндров фиксированы, с лицевой же стороны в опорах валов обеспечивается движение подшипников вдоль оси вала за счёт их проскальзывания в опорах (при тепловых деформациях валов). Это обеспечивается посадкой с зазором подшипника в корпусе (кроме сушильных цилиндров - там подвижность лицевых подшипников конструктивно обеспечивается по-другому, см. ниже).

**6). Удлинение шерстяных прессовых сукон при намокании и обратное их такое же укорочение при высыхании.** Эти деформации сукон обеспечиваются соответствующим ходом натяжных валов, заложенным в конструкцию сукнонатяжек.

**7). Умеренные пульсации давления и скорости в потоках бумажной массы** в массопроводах перед БДМ.

Эти пульсации вызывают умеренные колебания скорости бумажной массы при напуске на сетку и отсюда небольшие колебания массы  $1 \text{ м}^2$  бумажного полотна в машинном направлении. Такие колебания в определенных пределах допустимы, но при усилении пульсаций в потоке массы перед машиной и возрастании соответствующих колебаний массы  $1 \text{ м}^2$  нарастает обрывность бумажного полотна на БДМ.

**8). Умеренные колебания уровня бумажной массы и давления в воздушной подушке напорного ящика** (последствия здесь те же, что и по п.7).

**9). Шум, генерируемый элементами конструкции БДМ при работе** (например, отсасывающими валами, вакуум-насосами).

Это процесс в принципе также обратимый, так как при прекращении работы машины указанный шум прекращается. Однако, за время длительного

действия шума он вызывает необратимое ухудшение слуха у обслуживающего персонала. Для борьбы с указанным вредным воздействием шума принимаются различные меры (например, применяются наушники, улучшается конструкция узлов машины и др.).

Обратимые вторичные (сопутствующие) процессы временно меняют техническое состояние БДМ. При устранении их причин (например, при остановках БДМ) эти процессы практически прекращаются и вызываемые ими изменения в основном самоустраняются (кроме, например, указанных выше упругих деформаций конструкции БДМ из-за её веса и ухудшения слуха у обслуживающего персонала БДМ из-за генерируемого ею шума).

### **Примеры необратимых вторичных процессов на БДМ**

Это, в основном, процессы износа в широком смысле слова - процессы старения машины. Такие процессы начинают заметно развиваться после нескольких лет эксплуатации БДМ. Учитывая, что эти машины часто работают по 50 лет и более, а также с учётом достаточно высокого среднего возраста парка БДМ в России, указанные вторичные процессы значительно влияют на надёжность российского парка БДМ.

К необратимым вторичным (сопутствующим) процессам на БДМ относятся прежде всего следующие.

1). Собственно износ элементов конструкции БДМ и их одежды (износ вследствие взаимного трения элементов БДМ).

Например, в зубчатых передачах на боковых поверхностях зубьев со временем видны следы всех обычных видов износа металлов (окислительного, теплового, абразивного, усталостного).

В подшипниках качения наиболее выражен усталостный износ вплоть до появления раковин на беговых дорожках колец подшипников и отказов подшипников.

Обезвоживающие элементы сеточной части и сами сетки подвержены гидроабразивному износу. Сетки снимаются с машин, например, по достижении предельно допустимого уменьшения диаметра нитей утка из-за износа.

Износ лезвий шаберов в различных частях БДМ абразивный или гидроабразивный и т.д.

2). Усталостные явления, например, в цапфах валов и цилиндров, вплоть до поломок цапф.

3). Коррозия или её угроза (особенно в мокрой части машины). Для её предотвращения отдельные узлы и детали БДМ изготавливаются из нержавеющей сталей, цветных металлов (бронзы, сплавов алюминия), керамики, высокомолекулярного полиэтилена и других коррозионно-стойких материалов. Применяется также протекторная защита от коррозии балок и станин, изготовленных из черных металлов (углеродистой стали, чугуна)



листами нержавеющей стали. Наконец, применяется защитная окраска конструкций БДМ (но защитное действие окраски от коррозии длится не более, чем 3-4 года).

#### 4). Усталостная коррозия

Она развивается, например, в отверстиях перфорации отсасывающих валов в сеточной и прессовой частях посередине длины этих валов.

Совместное действие коррозии и знакопеременных напряжений в рубашке вала от максимального изгибающего момента ускоряет появление усталостных трещин в отверстиях перфорации и дальнейшее развитие коррозии в этих трещинах. Эти примеры (вплоть до разрушения перфорированных рубашек таких валов) встречаются на широких быстроходных БКДМ при изготовлении рубашек отсасывающих валов из нержавеющей стали. При замене таких рубашек на рубашки из бронзы угроза отказов из-за усталостной коррозии устраняется.

#### 5). Пластические деформации металла

Примером является "огранка" каландровых валов при обрывах бумажного полотна.

В отсутствие устройства для быстрого разведения каландровых валов при обрывах комки бумаги попадают между каландровыми валами. При этом валы приподнимаются, затем при уходе комков бумаги падают и бьются друг о друга. На их поверхности остаются следы от ударов, т. е. следы пластических деформаций в виде плоских площадок вдоль образующих вала.

При огранке каландровых валов усиливается обрывность бумаги на каландре.

#### 6). Пластическая (необратимая) составляющая вытяжки бумажного полотна на БДМ

Эта составляющая вытяжки наблюдается, например, при достаточно больших рассогласованиях по скорости между соседними приводными секциями БДМ, а также при достаточно сильных вибрациях проходящего по машине полотна, особенно с ростом скорости машины (вплоть до обрывов бумажного полотна на БДМ).

#### 7). Коробление тонкостенных литых чугунных конструкций

Например, такое коробление происходит в тонкостенных литых (из чугуна) корпусах привода сушильной части БДМ из-за наличия в них остаточных напряжений после литья. При таком короблении нарушаются стыки между частями корпуса привода, нарушается герметичность в целом корпуса привода, из-за чего начинаются протечки масла из корпуса наружу. Попадание масла на движущееся рядом бумажное полотно может приводить к выработке машиной брака.

#### 8). Заедание или его угроза

Заедание имеет место при трении скольжения металлических деталей друг по другу под большой нагрузкой. При этом нарушаются защитные окисные пленки на поверхности металла, в контакт вступают слои чистого металла.

Поэтому коэффициент трения скольжения, который, например, для сталей при наличии окисных пленок на поверхности деталей примерно равен  $\mu=0,2$ , возрастает до  $\mu=0,7$ . Для обеспечения проскальзывания приходится прикладывать повышенные усилия, на которые конструкция не рассчитана, что может привести к поломкам. Такая ситуация возможна, например, в лицевых подшипниковых опорах сушильных цилиндров из-за большого веса цилиндра. Для предотвращения поломок цапф корпуса подшипников здесь устанавливаются на качающихся призмах, либо на роликах.

#### 9). Перегрев металлоконструкции машины или его угроза

При перегреве стали возможно изменение структуры стали и её механических и других характеристик. Так, при монтаже подшипников качения тепловым способом недопустим их нагрев в масляной ванне до температуры свыше  $100^{\circ}\text{C}$ . При таком чрезмерном нагреве может произойти частичный отпуск подшипниковой стали. Из-за этого при охлаждении размеры внутреннего кольца подшипника не восстанавливаются до первоначальных размеров, и требуемый натяг внутреннего кольца на цапфе вала не создается.

10). Сильные колебания давления и скорости в потоках бумажной массы перед напорным ящиком

При этом бумажная масса будет подаваться на сетку машины при слишком больших колебаниях скорости напуска. При постоянной скорости сетки это приведёт к большим колебаниям массы  $1\text{м}^2$  бумажного полотна в машинном направлении, а также к таким же колебаниям влажности бумажного полотна на машине. Это, в свою очередь, повышает обрывность бумажного полотна, особенно с ростом её скорости, когда усиливается также вибрация бумажного полотна на открытых участках хода. Всё это ведет к усилению обрывности бумажного полотна на БДМ.

#### 11). Поломки элементов конструкции БДМ

Они могут происходить на всех стадиях эксплуатации машин. Например, сразу после пуска поломки могут быть из-за различных скрытых дефектов в конструкции новой БДМ, из-за погрешностей её монтажа и др. На второй стадии эксплуатации новой машины они могут происходить, например, из-за случайных перегрузок конструкции. Наконец, на третьей стадии эксплуатации поломки могут быть результатом износа подшипников, зубчатых передач, развития усталостных явлений в цапфах валов и цилиндров и т.д.

#### 12). Обрывы сеток

Имеют место из-за износа, случайного схода сетки на сторону и др.

#### 13). Обрывность бумажного полотна на БДМ

Основные причины обрывности бумажного полотна на БДМ изложены выше, например, в п.10 данного раздела. Эффективным средством борьбы с обрывностью является безобрывная проводка бумажного полотна на машине, когда устраняются участки свободного хода бумажного полотна.

#### 14). Ослабление крепежа

Из-за этого, например, в сушильных цилиндрах провисают неподвижные сифоны вплоть до касания с внутренней поверхностью вращающихся цилиндров и поломки сифона. Обычное средство борьбы с ослаблением крепежа-контргайки.

#### 15). Разрегулировка различных механизмов на БДМ

Подрегулировка указанных механизмов должна проводиться в порядке технического обслуживания машин.

16). Засорение и забивание отверстий в рубашках отсасывающих валов, в перфоплитах напорных ящиков, засорение прессовых сукон и др.

Для борьбы с указанными явлениями проводятся периодические прочистки и промывки отверстий и прессовых сукон.

17). Отложение различных микроорганизмов изнутри на стенках напорных ящиков, машинных и других бассейнов.

Для предотвращения и уменьшения этого явления устанавливаются специальные sprays в напорных ящиках и бассейнах.

При прекращении необратимых вторичных процессов (например, при остановках БДМ) их последствия в машинах остаются (они не самоустраиваются). Эти последствия могут накапливаться в виде различных повреждений элементов конструкций, износа одежды, получения бумажного брака. Постепенное накопление повреждений конструкции машины, её одежды может сильно изменить техническое состояние машины вплоть до отказов.

В дополнение к изложенному выше следует отметить, что отдельные вторичные (сопутствующие) процессы могут влиять друг на друга.

Так, износ подшипников качения сильно влияет на изменение их вибрационного, теплового, акустического режимов. Это используют, например, для непрерывного контроля состояния подшипников средствами технической диагностики, прежде всего использованием вибродиагностики.

Кроме того, все вторичные процессы на БДМ можно, как было указано выше, разделить на группы по скорости их развития:

1) Быстроразвивающиеся процессы (как обратимые, так и необратимые), например, вибрации металлоконструкций, их прогибы, огранка каландровых валов.

2) Процессы, развивающиеся со средней скоростью - это, например, умеренные тепловые деформации конструкций, изменение структуры сталей при перегреве.

3) Медленноразвивающиеся процессы - например, основные виды износа, усталостные явления, коррозия, коробление.

Для снижения вредных последствий вторичных процессов на БДМ принимаются многочисленные меры при создании машины и её эксплуатации (см. ниже).

### ***Примеры отказов БДМ (на БДМ)***

С точки зрения ГОСТ 27.002-89, где дана обязательная на сегодня классификация отказов техники, на БДМ в течение всего срока их службы встречаются практически все основные виды отказов, указанные в этом ГОСТе. Приведём примеры таких отказов:

1) Отказы внезапные и постепенные

- *внезапные отказы* БДМ (на БДМ): обрывность бумажного полотна, обрывы и другие отказы сеток из-за износа, внезапного схода на сторону, скачков натяжения сетки, поломки элементов конструкции, например, из-за случайных перегрузок, скрытых дефектов конструкции, погрешностей монтажа (например, неправильного выставления радиальных зазоров в подшипниках, боковых и радиальных зазоров в зубчатых передачах);

- *постепенные отказы*:

а) отказы постепенные по развитию, но внезапные по проявлению (поломки элементов конструкции и обрывы сеток, являющиеся следствием постепенного износа или развития усталостных явлений и затем случайных перегрузок - например, поломки подшипников, зубчатых передач, цапф валов, цилиндров).

При контроле технического состояния узлов появляется возможность прогнозирования таких отказов (периодический контроль состояния узлов проводится при ревизиях, непрерывный контроль - средствами технической диагностики или органолептически, т. е. с использованием органов чувств человека - прослушиванием подшипников с помощью слуховых трубок, контроля нагревания корпусов подшипников касанием рукой и пр.).

Развитие предпосылок такого отказа, например, в зубчатой передаче из-за износа боковых поверхностей зубьев и уменьшения их толщины, видно из графика на рис. 4.1.

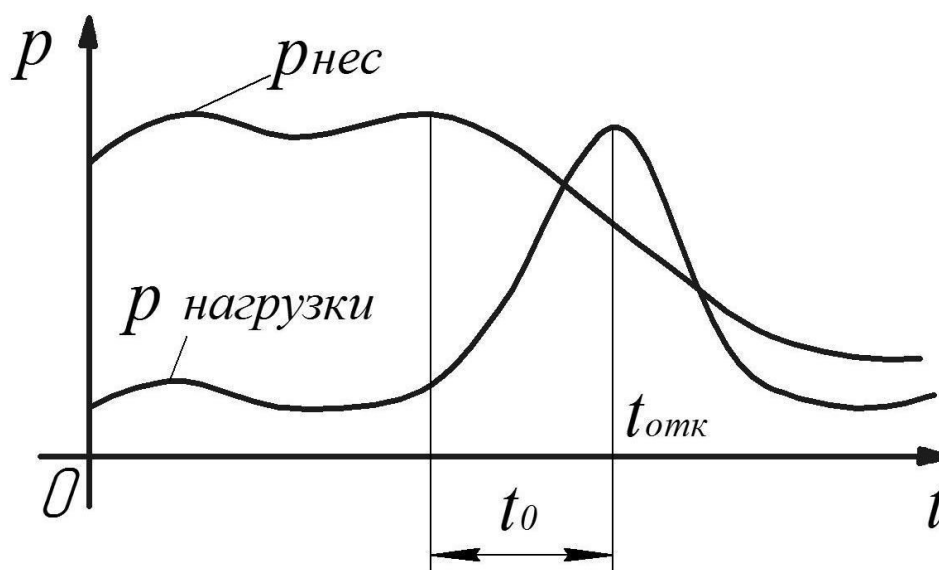


Рис. 4.1. Развитие предпосылок постепенного отказа зубчатой передачи (по п. а)

Здесь  $P_{нес}$  - несущая способность зубчатой передачи,

$P_{\text{нагр.}}$  - случайная нагрузка на передачу,

$t_{\text{отк}}$  - момент отказа передачи из-за поломки зуба,

$t_0$  - время развития предпосылки отказа (экспозиция отказа).

Пусть  $t^*$  - промежуток времени между ревизиями зубчатой передачи или время срабатывания системы контроля передачи средствами технической диагностики (или органолептически).

Тогда, если  $t^* < t_0$ , то отказ прогнозируемый, а если  $t^* > t_0$  - отказ непрогнозируемый;

б) отказы постепенные и по развитию, и по проявлению: например, постепенно наступающее недопустимое ухудшение равномерности влажности бумажного полотна по ширине машины на накате из-за постепенного износа бомбировки прессовых обрезиненных валов.

## 2) Отказы независимые и зависимые друг от друга

Для нормальной работы каждой части БДМ необходима нормальная работа всех основных узлов данной части машины, а также вспомогательных систем, обеспечивающих её нормальную работу.

Например, если отказала вакуум-система сеточной части БДМ, то сеточная часть не обеспечит нужной сухости бумажного полотна после неё, т. е. сеточная часть откажет по параметру "сухость бумажного полотна". Здесь отказ сеточной части - зависимый от отказа вакуумной системы.

Примеры независимых отказов.

Отказ механизма прижима прессового вала никак не зависит от отказов гидропланок в сеточной части (и наоборот), поэтому данные отказы независимы один от другого (взаимно независимы).

## 3) Отказы явные и скрытые

Примеры скрытых отказов:

Выработка брака на накате или отказы отдельных частей БДМ по параметру "сухость бумажного полотна" - это скрытые отказы БДМ или её частей, так как для обнаружения таких отказов необходимо проведение специальных анализов в лаборатории.

Примеры явных отказов:

Это, например, остановки БДМ из-за обрывов бумажного полотна, сетки, поломок узлов. Факты таких отказов устанавливаются простым наблюдением.

## 4) Сбои (отказы самоустраняющиеся или устраняемые незначительным вмешательством оператора)

Например, в АСУТП БДМ, построенных на электронике, из-за колебаний температуры окружающей среды могут "плыть" характеристики отдельных элементов электронных схем вплоть до отказа какой-либо схемы в целом. При восстановлении температуры среды характеристики элементов схем восстанавливаются, и отказ схемы самоустраняется.

Другим примером сбоев являются отказы spryskov из-за засорения их отверстий, часто легко устранимого оператором прочисткой отверстий.

5) Перемежающиеся отказы (повторяющиеся одинаковые сбои) - см. примеры п.4 в случаях их неоднократного повторения.

6) Виды отказов в зависимости от их причин:

- *конструкционные отказы*

В качестве примера можно привести поломки бочек (рубашек) сетко- или сукноведущих валов, когда уравнивающие грузы этих валов крепились не в торцевых патронах, а винтами к бочке вала изнутри, ближе к середине машины. При этом происходят поломки бочек валов в сечениях, ослабленных винтами. Здесь отказы происходят из-за неудачной конструкции валов;

- *технологические отказы* (происходят из-за нарушения технологии изготовления отказавших изделий)

Примером является снижение долговечности элементов конструкции БДМ, изготовленных на предприятиях ЦБП в качестве запчастей из материалов непроектных марок;

- *эксплуатационные отказы* (происходят из-за нарушения правил эксплуатации).

В качестве примера можно привести повышение обрывности бумажного полотна на БДМ при выработке газетной бумаги при недопустимом снижении содержания целлюлозы в композиции бумажной массы (здесь из-за уменьшения содержания в мокром бумажном полотне длинноволокнистой фракции целлюлозы снижается влагопрочность мокрого бумажного полотна на машине, что повышает указанную обрывность).

7) Ресурсные отказы

Например, отказы подшипников нередко ведут к их полной утрате, т. е. ресурсы подшипников при таких отказах заканчиваются.

8) Деграционные отказы

Это отказы из-за неизбежного и неустраняемого старения изделия при эксплуатации (при их правильных создании и эксплуатации) - такими отказами могут быть также поломки подшипников, цапф валов, зубчатых передач и др.

Как было отмечено выше, используются и другие наименования отказов техники по их видам (кроме приведённых в ГОСТ 27.002-89).

Например, на практике различают следующие отказы на БДМ - лёгкие, средние и тяжёлые. Примеры таких отказов:

- на БДМ к *лёгким отказам* можно отнести засорение spryskov, износ отдельных гидропланок (ущерб от них много меньше стоимости отказавшего узла);

- *при средних отказах* ущерб от них сравним со стоимостью узла.

Примерами являются отказы узлов, ведущие к их утрате и отсюда к необходимости установки запасных узлов (например, установка запасного подшипника при утрате отказавшего подшипника вала);

- при тяжелых отказах ущерб от них значительно превышает стоимость отказавшего узла.

К таким относятся отказы, приводящие к длительным простоям БДМ и даже всей технологической линии предприятия ЦБП (например, отказ центрального гранитного вала многовального пресса при отсутствии таких запасных валов на складе).

Отказы на БДМ можно также (по проф. Проникову А.С., с. 17) разделить на отказы функционирования и параметрические отказы.

Возможны отказы функционирования как БДМ в целом (например, при обрывах бумажного полотна), так и такие же отказы отдельных частей, узлов и механизмов (например, отказы сеточной части из-за обрыва сетки, отказы гауч-вала, привода дырчатых валов в напорных ящиках). Параметрические отказы также могут быть у всей машины (например, из-за брака на накате), или у отдельных частей или узлов машины (например, по параметру сухости бумажного полотна после данных части или узла).

Пример влияния надёжности основных частей машины на надёжность БДМ в целом приведён в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обследования БДМ №6 Балахнинского ЦБК  
(продукция: газетная бумага, 1980-е гг.):

Часть машины	Относительное количество отказов, %	Относительная длительность простоев, %
Сеточная	11,8	9,3
Прессовая	20,6	23,8
Сушильная	51,5	40,6
Напорный ящик	6,7	9,8
Каландр	9,4	16,5

Выше было отмечено, что надёжность БДМ в целом и по элементам конструкции зависит как от надёжности конструкции машины, так и от соблюдения технологического режима БДМ, поэтому используются термины: конструкционная надёжность БДМ и ее технологическая надёжность.

В заключение раздела об отказах БДМ (на БДМ) отметим, что наиболее аварийно-опасными узлами этих машин являются подшипники, шестерни зубчатых передач привода сушильной части, конденсатоотводные сифоны и черпаки в сушильных цилиндрах, обрезинковка прессовых валов, бочки сукно- и сетководущих валов, рубашки отсасывающих валов, цапфы валов и сушильных цилиндров в местах перехода на больший диаметр.

#### **4.3. Надёжность целлюлозного (и в целом химического оборудования). Причины отказов этого оборудования**

Статистический анализ надежности химического и, в частности, целлюлозного оборудования показывает, что примерно 90 % его работает достаточно надежно, а около 10 % - это малонадежное оборудование со средней наработкой на отказ менее 300 часов [6].

В химической промышленности малонадежным является следующее оборудование (с указанием его долей по стоимости от всего малонадежного оборудования, %):

- теплообменники всех видов	- 35,8
- ёмкости с мешалками	- 25,9
- ёмкостные аппараты	- 16,4
- фильтры всех типов	- 8,7
- колонны	- 4,2
- сушилки всех типов	- 3,5
- прочее	- 5,5

Таким образом, примерно 60% всего малонадежного химического оборудования составляют теплообменники и аппараты с мешалками.

Для химического (в том числе целлюлозного оборудования) характерны следующие причины отказов, %:

- коррозионный износ даёт свыше 60 % всех отказов;
- поломки деталей машин и аппаратов, износ деталей привода, разрушение лакирующего (защитного) слоя стенок аппаратов, износ подшипников, износ сальников, закупорка труб, прогары корпуса (каждая из этих причин даёт менее 10 % отказов).

Таким образом, ведущей причиной отказов такого оборудования является коррозионный износ.

#### 4.3.1. Виды коррозионного износа

Как известно, коррозия металла - это вид его разрушения при химическом и электрохимическом взаимодействии металла с окружающей средой.

По характеру разрушения коррозия металла может быть сплошной (равномерной по площади) или местной (в виде отдельных трещин, отверстий, язвин, пятен и др.).

В химических и родственных им производствах отказы оборудования по видам коррозии распределяются следующим образом, %:

- коррозионное растрескивание	- 35
- дырочная коррозия	- 20
- общая (равномерная) коррозия	- 18
- межкристаллитная коррозия	- 16
- другие виды коррозии (например, усталостная коррозия)	- 11



Все вышеприведённые статистические данные по надёжности относятся к 60-80 гг. XX века (в химической промышленности СССР).

### *Характеристика видов коррозионного износа*

1) Коррозионное растрескивание имеет место в основном в стенках аппаратов и трубопроводов. Сквозные трещины здесь практически неожиданно появляются при одновременном действии на металл двух факторов:

- коррозионное воздействие агрессивной среды на металл;
- наличие остаточных напряжений в металле.

При этом такое растрескивание происходит только при остаточных растягивающих напряжениях в металле.

Характерные места на оборудовании, где появляются сквозные трещины в стенках аппаратов и трубопроводов, следующие: сварные швы (точнее, стенка рядом со швом), изогнутые трубы, листы, места развальцовки труб. Растягивающие остаточные напряжения появляются также в деталях, полученных штамповкой, точением, если эти напряжения не сняты специальной термообработкой.

Коррозионному растрескиванию более подвержены крупнозернистые стали, поэтому все виды термообработки, влияющие на зернистость сталей, отражаются и на их склонности к коррозионному растрескиванию (в частности, специальной термообработкой достигается снижение склонности металла к такому растрескиванию).

При попытке заварить основную трещину сваркой раскрываются соседние микротрещины, поэтому надёжный ремонт здесь возможен лишь при полном удалении всего поражённого участка, например, его вырубкой.

Коррозионному растрескиванию не предшествует заметное изменение свойств металла, в том числе его механических свойств, поэтому здесь не редко происходят аварийные остановки оборудования.

2) Дырочная коррозия. При этом под действием коррозионной среды в стенках аппаратов появляются сквозные отверстия.

Этот вид коррозии особенно опасен для аппаратов, работающих под давлением. Многие такие аппараты имеют биметаллические стенки (внутренний защитный слой стенки выполнен из нержавеющей стали, наружный - из углеродистой стали, обычно котельной); например, это характерно для биметаллических варочных котлов в производстве целлюлозы.

Для обнаружения коррозионного повреждения внутреннего (защитного, т.е. плакирующего) слоя в наружном слое выполняются сигнальные отверстия, появление продукта в этих отверстиях говорит о коррозионном повреждении внутреннего (плакирующего) слоя.

3) Межкристаллитная коррозия. Коррозионное разрушение здесь идет от поверхности внутрь по границе между зёрнами стали. Главная опасность при этом то, что продукты коррозии остаются внутри металла. Внешний вид конструкции здесь не меняется, а её механические характеристики сильно снижаются. При этом, возможны внезапные отказы даже при сниженных нагрузках. Это встречается, например, при сварке хромоникелевых нержавеющей сталей.

Для снижения склонности стали к межкристаллитной коррозии применяют её нагрев до  $t \cong 1100$  °С с последующей закалкой стали водой.

4) Сплошная (равномерная) коррозия. Имеются два основных вида такой коррозии:

- атмосферная коррозия (это обычное ржавление металла на воздухе);
- кислородная коррозия (характерна для трубопроводов подачи свежей воды, в которой всегда есть растворённый кислород).

Для защиты от атмосферной коррозии применяют окраску конструкций, её антикоррозионную металлизацию, покрытие черного металла (углеродистых сталей, чугуна) листами нержавеющей стали.

Средства защиты от кислородной коррозии следующие:

- использование замкнутых систем подачи воды, т. е. систем без подпитки свежей водой;
- добавление в свежую воду химикатов, снижающих содержание в ней кислорода.

Долговечность конструкции при сплошной коррозии оценивается по заложенному в конструкцию припуску на коррозию.

При местных видах коррозии произвести оценку конструкции на долговечность сложнее, но она возможна по данным статистики отказов, иначе говоря, методами теории надежности.

В целом по всем видам коррозии ей в наибольшей степени подвержены следующие места на оборудовании:

- зоны с высокой скоростью движения агрессивной среды, особенно при наличии в ней абразива (здесь с ростом скорости больше нарушаются защитные окисные плёнки на металле – например, у входных и выходных патрубков емкостей);
- участки конструкции с остаточными напряжениями в них;
- застойные зоны агрессивной среды;
- зоны её нагрева;
- узлы трения в агрессивных средах (при нагреве и трении коррозия металла ускоряется).

#### **4.3.2. Надёжность технологических линий химических (в том числе целлюлозно-бумажных) производств**

Особенностью большинства химических производств, в том числе ЦБП, является то, что всё основное оборудование здесь сконструировано в виде единой технологической линии (или нескольких линий (цепочек)).

В таких условиях внимание к надёжности каждого элемента линии должно быть повышено, так как отказ одного элемента может остановить линию в целом. Это приводит к большим экономическим потерям, чем отказ отдельно работающей такой же машины (аппарата).

Ещё больше внимания должно уделяться надёжности крупногабаритных аппаратов в составе линий, поскольку их простои обходятся дороже.

Следует учитывать также, что у сварных крупногабаритных аппаратов вероятность отказа повышена из-за большой суммарной протяжённости сварных швов и большей суммарной площади уплотнительных зон.

Надёжность химического оборудования зависит от вида рабочей агрессивной среды в нём. Например, надёжность одинаковых насосов при прокачке разных химикатов разная. При этом у насосов большая часть отказов связана с протечками в уплотнениях. В связи с этим рекомендуется шлифовка участков валов насосов в уплотнениях, так как при грубой обработке этих участков они быстрее изнашивают уплотнения вплоть до протечек.

В целом надёжность технологической линии оценивается по соотношению:

$$P_n = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_i \times \dots \times P_n,$$

где  $P_i$  – надёжность  $i$  – го элемента линии .

### *Резервирование в технологических линиях*

Для повышения надёжности технологических линий химических производств (в том числе производств целлюлозно-бумажной промышленности) в них нередко рядом с основными элементами линий (аппаратами и машинами) устанавливаются резервные элементы линий (такие же аппараты и машины), которые используются при отказе основных (это структурное резервирование).

В каждом случае целесообразность резервирования проверяется экономически.

Для крупнотоннажного химического оборудования такое резервирование практически исключено из-за его высокой стоимости.

Наиболее часто резервируется насосное оборудование. Кроме того, иногда резервируют участки технологических линий или короткие линии (цепочки) целиком. Например, если в древесно – подготовительном цехе (ДПЦ) целлюлозно – бумажного комбината (ЦБК) имеются три линии, состоящие каждая из корообдирочного барабана, рубительной машины и вибрационных сортировок, то для повышения надёжности здесь может быть предусмотрена

ещё резервная (четвёртая) линия в том же составе, используемая при отказе какой-либо из основных линий.

Чаще всего применяется ненагруженное структурное резервирование, когда резервное оборудование используется только при отказе основного.

Но иногда, например, если недопустима даже кратковременная остановка в работе линии, применяется и нагруженное резервирование. При нём резервное оборудование работает всё время, в том числе и одновременно с основным.

Например, если в линии должно непрерывно производиться кипячение продукта и недопустимы даже кратковременные перерывы в кипячении, то в линию устанавливаются рядом два одинаковых кипятильника - основной и резервный, работающие всё время одновременно и каждый в половину своей мощности. При отказе любого из них второй продолжает работу на 100 % своей мощности, например, на время ремонта отказавшего.

Выше было отмечено, что на химических производствах нередко встречаются по несколько одинаковых цепочек аппаратов.

Так, в производствах синтетического каучука обычно имеются по 4 ÷ 5 одинаковых линий (цепочек). Каждый аппарат в цепочках допускает некоторую перегрузку по производительности.

При отказе какого-либо аппарата, чтобы не останавливать при его ремонте всю данную цепочку, нагрузка этого аппарата может быть распределена между такими же аппаратами в других цепочках на время ремонта отказавшего аппарата.

Для возможности такого режима должна быть предусмотрена соответствующая трубопроводная обвязка всех аппаратов в цепочках.

## **5. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ**

Количественно надёжность техники оценивается показателями надёжности. Эти показатели, прежде всего, делятся на две группы:

- единичные показатели надёжности;
- комплексные показатели надёжности.

Каждый единичный показатель количественно оценивает какое-либо одно простое свойство надёжности (безотказность или долговечность и т.д.). Каждый комплексный показатель одновременно оценивает два или более простых свойств надёжности.

Величины показателей надёжности наиболее точно оцениваются по данным эксплуатации (испытаний на надёжность) работающих образцов техники. При этом чем на более широкой базе по количеству проверяемого оборудования определены такие показатели, тем точнее полученные данные.

При отсутствии возможности экспериментального получения величин показателей надёжности они предварительно могут быть оценены аналитически.

Различают понятия: статистическая оценка показателя надёжности и его математическое ожидание.

Статистическая оценка получается по данным эксплуатации (испытаний) нескольких одинаковых изделий, работающих в требуемых одинаковых условиях. Число используемых изделий при этом нередко бывает недостаточно для точного определения показателя. При увеличении числа изделий точность определения статистической оценки показателей повышается. При этом они (показатели) стремятся как к пределам к своим точным значениям, которые называются математическими ожиданиями величин этих показателей надёжности.

## 5.1. Единичные показатели надёжности

### 1) Показатели безотказности (используются для оценки надёжности как невосстанавливаемых, так и восстанавливаемых изделий)

а - вероятность безотказной работы (показатель также может характеризовать надёжность как восстанавливаемой, так и невосстанавливаемой техники).

Например, при работе группы одинаковых невосстанавливаемых изделий вероятность безотказной работы  $P(t)$  изделия за время  $t$  оценивается по соотношению:

$$P(t) \cong P^*(t) = \frac{N_p(t)}{N_p(0)} = \frac{N_p(t)}{N},$$

где  $P^*(t)$  – статистическая оценка показателя  $P(t)$ ,  
 $N_p(t)$  – количество работоспособных изделий, оставшихся к моменту времени  $t$ ,  
 $N_t(0) = N$  – исходное количество работающих изделий (или поставленных на испытания) при  $t=0$ .

Таким образом, величина  $P(t)$  принимается равной доле работоспособных изделий, оставшихся к моменту времени  $t$ .

При небольшом количестве изделий  $N$  в группе получается достаточно грубая статистическая оценка этого показателя  $P^*(t)$ . При увеличении  $N$   $P^*(t)$  уточняется, стремясь как к пределу к точному значению  $P(t)$ :

$$P^*(t) \rightarrow P(t).$$

при  $N \rightarrow \infty$

б - средняя наработка до отказа (характеризует надёжность невосстанавливаемых изделий).

По данным испытаний группы таких изделий показатель определяется как среднее арифметическое всех наработок до отказа в группе;

в - гамма – процентная ( $\gamma\%$ - ная) наработка до отказа (характеризует надёжность невосстанавливаемых изделий).

Это наработка до отказа, которую имеют не менее  $\gamma$  процентов всех изделий данного вида;

$\gamma$  - назначенная наработка до отказа (характеризует надёжность невосстанавливаемых изделий).

Это наработка, по достижении которой для повышения надёжности изделие снимается с эксплуатации независимо от его фактического технического состояния;

$d$  - средняя наработка на отказ (характеризует надёжность восстанавливаемых изделий).

Показатель определяется делением суммарной наработки изделия за какой-то срок службы на количество отказов за этот срок службы. В группе одинаковых восстанавливаемых изделий показатель определяется как среднее арифметическое таких показателей у всех изделий за один и тот же срок службы в одинаковых условиях;

$e$  - интенсивность отказов  $\lambda(t)$  (характеризует надёжность невосстанавливаемых изделий).

Для получения величины  $\lambda(t)$  по данным эксплуатации (испытаний) группы одинаковых восстанавливаемых изделий частоту отказов в группе изделий при данном  $t$  делят на количество оставшихся работоспособных изделий к этому же моменту времени  $t$ :

$$\lambda(t) \cong \lambda^*(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t \times N_p(t)} \left[ \frac{\text{отк.}}{\text{час}} \right]$$

Здесь  $\Delta n$  – количество отказов в группе изделий за время  $\Delta t$  при данном  $t$ ;

$\frac{\Delta n}{\Delta t}$  – частота отказов в данной группе изделий (приблизительно) при данном  $t$ ;

$N_p(t)$  – количество работоспособных изделий в группе, оставшихся при данном  $t$ .

Таким образом,  $\lambda(t)$ - это частота отказов в группе при данном  $t$  в расчете на одно оставшееся работоспособным изделие в этот же момент времени  $t$ ;

$ж$  - кроме показателя  $\lambda(t)$  частота отказов в группе одинаковых восстанавливаемых изделий характеризуется также показателем  $f(t)$ - частотой отказов в расчёте на одно исходное изделие в данной группе:

$$f(t) \cong f^*(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t \times N} \left[ \frac{\text{отк.}}{\text{час}} \right].$$

Здесь  $N$ - исходное число испытываемых (эксплуатируемых) изделий в группе ( $N=N_p(0)$ ). Так как  $N_p(t) \leq N_p(0)$ , то  $\lambda(t) \geq f(t)$ .

$з$  - среднее количество отказов  $\bar{n}(t)$  у одного изделия в группе за время  $t$  (показатель характеризует надёжность восстанавливаемых изделий):

$$\bar{n}(t) = \frac{\sum n_i(t)}{N} [\text{отк.}].$$

Здесь  $n_i(t)$  – количество отказов за время  $t$  у  $i$  – го изделия в группе

### ОДИНАКОВЫХ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ,

$N$  — количество изделий в этой группе.

Можно считать, что величина  $\bar{n}(t)$  даёт также количество отказов за время  $t$  у одного усреднённого (по отказам) изделия в группе (изделия с таким количеством отказов  $\bar{n}(t)$  в группе может и не быть, но понятие об усреднённом (по отказам) изделии в группе полезно (см. параметр потока отказов));

и  $\Lambda(t)$  — параметр потока отказов  $\Lambda(t)$  (характеризует надёжность восстанавливаемых изделий)

Поток отказов — это последовательность моментов времени отказов в группе одинаковых восстанавливаемых изделий. По величине  $\Lambda(t)$  равен:

$$\Lambda(t) = \frac{d\bar{n}}{dt} \cong \frac{\Delta\bar{n}}{\Delta t} \left[ \frac{\text{омк}}{\text{час}} \right].$$

По смыслу величина  $\Lambda(t)$  даёт частоту отказов при данном  $t$  у усреднённого (по отказам) изделия в группе изделий.

Показателей по пп. ж и з в ГОСТах нет, но они используются в технической литературе и на практике.

### 2) Показатели долговечности (для восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий)

Показатели долговечности делятся на две группы: ресурсы изделий и сроки службы изделий.

Имеются следующие разновидности ресурсов:

- технический ресурс изделия (ресурс изделия) — это суммарная наработка изделия с момента ввода его в эксплуатацию (или после капитального ремонта) и до наступления предельного состояния изделия (см. выше);

- средний ресурс изделия — определяется как среднее арифметическое технических ресурсов в группе изделий данного вида;

- гамма — процентный ( $\gamma$  % - ный) ресурс изделия - это ресурс, который имеют не менее  $\gamma$  процентов изделий данного вида;

- назначенный ресурс — ресурс, по истечении которого для повышения надёжности изделие должно сниматься с эксплуатации, независимо от его фактического состояния.

Срок службы изделия отличается от ресурса этого изделия, выраженного в единицах времени, дополнительным учётом всех возможных остановов и простоев изделия. Разновидности сроков службы используются те же, что и у ресурсов.

### 3) Показатели ремонтпригодности (для восстанавливаемых изделий, так как ремонт невосстанавливаемых изделий не производится)

Основных показателей ремонтпригодности два:

- время восстановления после отказа  $T_{\text{в}}$ ;

- вероятность восстановления за заданное время  $P_{\text{в}}(t)$ .

Величина  $T_{\varepsilon}$  (для данного изделия после данного отказа) на практике определяется как время ремонта данного изделия после данного отказа (т. е. время восстановления работоспособности изделия  $T_{\varepsilon} = T_{p.e.m.}$ ).

Вероятность восстановления за заданное время  $P_{\varepsilon}(t)$  определяется аналогично вероятности безотказной работы  $P(t)$ :

$$P_{\varepsilon}(t) \cong P_{\varepsilon}^*(t) = \frac{N_{\varepsilon}(t)}{N_{n\varepsilon}(0)}.$$

Здесь  $P_{\varepsilon}^*(t)$  – статистическая оценка  $P_{\varepsilon}(t)$ ,

$N_{\varepsilon}(t)$  – количество изделий в группе, восстановленных за время  $t$ ;

$N_{n\varepsilon}(0)$  – количество изделий, поставленных на восстановление при  $t=0$ .

Время  $t$  у каждого изделия – это время его ремонта (при этом необязательна одновременная постановка на ремонт всех изделий данной группы).

Всего, согласно ГОСТу, имеется несколько десятков показателей ремонтпригодности. Они характеризуют различные её аспекты, такие как: время, стоимость, трудоёмкость восстановления, ремонтодоступность изделия, его контролепригодность, легкосъёмность узлов, степень унификации узлов и деталей данного оборудования, монтажепригодность изделия и т.д.

#### **4) Показатели сохраняемости надёжности (для восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий)**

Например, при хранении на складе используются следующие показатели надёжности данной группы:

- допустимое время хранения в данных условиях;
- гаммапроцентный ( $\gamma$  %- ный) срок хранения;
- назначенный срок хранения.

## **5.2. Комплексные показатели надёжности**

1. Коэффициент готовности  $K_r$ :

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_{\varepsilon}},$$

где

$T_0$  – средняя наработка на отказ (показатель безотказности);

$T_{\varepsilon}$  – среднее время восстановления после отказов (показатель ремонтпригодности).

Величина  $K_r$  одновременно характеризует безотказность и ремонтпригодность восстанавливаемого изделия.

По данным эксплуатации  $K_r$  даёт долю времени, предназначенного для работы изделия, в течение которой это изделие действительно работало. На будущее также можно сказать, что  $K_r$  даёт вероятность того, что за время, предназначенное для работы, изделие действительно будет работать (в тех же условиях).

2. Коэффициент технического использования  $K_{ти}$ :



$$K_{ми} = \frac{\Sigma T_{i\text{ раб}}}{\Sigma T_{i\text{ раб}} + \Sigma T_{i\text{ рем}} + \Sigma T_{i\text{ т.о.}}},$$

где  $\Sigma T_{i\text{ раб}}$  – суммарное время периодов действительной работы изделия за назначенный срок службы (обычно за год);

$\Sigma T_{i\text{ рем}}$  – суммарное время простоев изделия на ремонт за тот же срок службы;

$\Sigma T_{i\text{ т.о.}}$  – суммарное время, затраченное на техническое обслуживание изделия за тот же срок службы.

Величина  $K_{ми}$  также одновременно характеризует безотказность и ремонтпригодность восстанавливаемых изделий.

### Пример. Основные показатели надёжности БДМ

Для БДМ в целом наиболее применяемые показатели надёжности – это срок службы машины и её коэффициент технического использования.

В ЦНИИбумаше в своё время проектировали БДМ на срок службы 25 лет, величина  $K_{ми}$  зависит от назначения машины, её скорости, обрезной ширины, срока эксплуатации и др.

Кроме указанных показателей применяются также следующие:

$T_0$  – средняя наработка машины на отказ (характеристика безотказности БДМ);

$T_в$  – среднее время восстановления машины после отказа – по видам отказов (характеристика ремонтпригодности БДМ, а также её элементов).

Коэффициент технического использования  $K_{ти}$  БДМ ввиду непрерывного режима работы машины характеризует степень использования рабочего времени для выпуска машиной кондиционной продукции и является важнейшим комплексным показателем надёжности БДМ. Ввиду отмеченной особенности рабочего режима БДМ (непрерывного режима её работы) величина  $K_{ти}$  подсчитывается также по уточнённому выражению:

$$K_{ти} = \frac{t_m - t_{нп} - t_{пл}}{t_m},$$

где  $t_m$  – срок службы машины (например, при обследовании);

$t_{нп}$  и  $t_{пл}$  – суммарная продолжительность, соответственно, внеплановых и плановых простоев на ремонт и техническое обслуживание,  $\tau$ .

В табл. 2 приведены значения показателей надёжности для БДМ с различной шириной бумажного полотна В и рабочей скоростью V:

Таблица 2

Показатели надёжности для различных БДМ

БДМ		$K_{ти}$	Наработка на отказ, час
Обрезная ширина В, мм	Рабочая скорость V, м/мин		
4200	300	0,947	820
4200	600	0,937	800
6300	300	0,922	810
6300	600	0,915	780

Из данных табл. 2 видно, что скорость и ширина машины влияют на уровень её надёжности, при этом повышение скорости приводит к увеличению, в основном, частоты остановов, а их длительность зависит от ширины.

Показатели  $T_o$  и  $T_s$  применяются также для оценки надёжности отдельных элементов конструкции БКДМ.

## **6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ НА ОСНОВНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Основные этапы жизненного цикла оборудования (например, машин и аппаратов) следующие:

- 1) Проектирование и конструирование (при необходимости с проведением предварительных исследований)
- 2) Изготовление
- 3) Монтаж, пуск, наладка
- 4) Эксплуатация
- 5) Физический и (или) моральный износ (как рациональная граница эксплуатации).

Известно, что на стадиях создания машины (этапы 1, 2, 3) обеспечивается базовая надёжность машин и аппаратов, на стадии эксплуатации (этапы 4, 5) обеспечивается эксплуатационная (фактическая) его надёжность [3].

### **6.1. Обеспечение базовой надёжности оборудования**

Базовая надёжность оборудования обеспечивается в 2 этапа:

- при разработке проектной документации;
- при изготовлении оборудования.

Разработке проектной документации должен предшествовать анализ фактической надёжности в работе образцов техники, ближайших к разрабатываемой (изучение надёжности ближайшего прототипа). При этом выявляются «слабые» места прототипа, лимитирующие его надёжность и в целом качество работы, при проектировании принимаются меры к их улучшению (вплоть до устранения).

При этом надёжность разрабатываемого оборудования может быть обеспечена и улучшена за счет улучшения конструкции, применения высоконадёжных материалов, упрочнения элементов конструкции, использования защитных покрытий (в том числе антикоррозионных) и др.

Повышение надёжности за счет улучшения конструкции, т. е. улучшение конструктивной надёжности оборудования, может быть достигнуто, например, уменьшением или устранением перегрузок отдельных элементов конструкции, в том числе динамических перегрузок - под действием сил инерции, по возможности более равномерным распределением нагрузки по всем элементам конструкции, упрощением конструкции, использованием опыта живой природы и т.д.

*Пример.* Повышение надёжности дисковых рубительных машин (наряду с улучшением основного технологического процесса рубки) в своё время было достигнуто при переходе с малоножевых машин на многоножевые.

При работе ранних малоножевых машин (при числе ножей  $z=3\div 4$ ), как показывают расчёты и измерения, угловая скорость вращения  $\omega$  вала машины уменьшалась при рубке баланса со временем следующим образом (рис. 6.1):

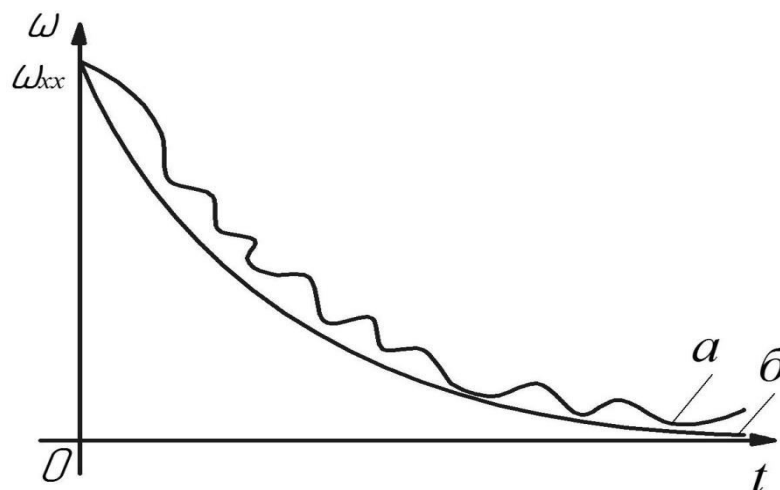


Рис. 6.1. Уменьшение угловой скорости вращения вала рубительной машины при рубке баланса

Видно, что в данном случае снижение величины  $\omega$  (при работе машины с асинхронным двигателем) было неплавное, с выходом на участок пульсаций

$\omega$  на примерно постоянном уровне. В данном случае уменьшение угловой скорости  $\omega$  обусловлено «мягкой» статической характеристикой асинхронного электродвигателя. Пульсация скорости вызывалась тем, что при малом количестве ножей баланс при рубке находится то между ножами (тогда двигатель работает в режиме холостого хода и величина  $\omega$  растёт, стремясь к  $\omega_{x,x}$ ), то под ножом (здесь  $\omega$  уменьшается из-за мягкой статической характеристики двигателя).

Неравномерность вращения вала приводит к ускорениям элементов конструкции (для вала  $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon \neq 0$ ) и, соответственно, к инерционным нагрузкам на элементы машины. Наиболее неблагоприятно это влияет на подшипники качения вала. Из-за динамических ударов тел качения (роликов) о сепараторы эти сепараторы разрушаются, и подшипники выходят из строя. Аварийность подшипников качения была характерной для малоножевых рубительных машин.

Для снижения данной аварийности на малоножевых машинах сначала устанавливали маховик, сглаживающий пульсации угловой скорости  $\omega$  вала. Затем для более радикального решения вопроса стали увеличивать количество ножей  $z$  на машине (длительное время рубительные машины работали при  $z=10$ , сейчас эти машины работают в основном при  $z=15 \div 16$ ). При этом даже при тонких балансах отсутствуют периоды времени, когда при рубке баланс находится между ножами, в результате скорость вращения вала замедляется более плавно (без пульсации величины  $\omega$ ), аварийность подшипников из-за поломок сепараторов устраняется.

При разработке принципиально новых образцов конструкций оборудования при необходимости проводятся предварительные испытания опытных образцов конструкции, либо апробируются опережающие образцы новых по конструкции узлов на промышленном оборудовании (например, на БДМ).

В качестве примеров повышения надежности оборудования ЦБП за счет применения высоконадёжных материалов можно привести следующие:

- применение титана взамен нержавеющей стали при изготовлении отбельного оборудования позволило значительно повысить его долговечность и снизить аварийность благодаря большей коррозионной стойкости титана;
- применение керамики и высокомолекулярного полиэтилена низкого давления позволило значительно повысить долговечность обезвоживающих элементов в сеточных частях БДМ и КДМ (гидропланок, крышек отсасывающих ящиков) из-за большей износостойкости этих материалов.

Аналогичный результат дал переход с бронзовых сеток на синтетические из полиэфирного моноволокна.

- применение покрытий желобчатых прессовых валов нержавеющей сталью взамен обрешивки также повысило долговечность этих валов. Однако, при этом возможно снижение сроков службы прессовых сукон.

Упрочнение деталей оборудования часто достигается их термообработкой, при этом возможно и повышение износостойкости поверхностей. Аналогичный результат достигается также нанесением защитных покрытий.

При разработке конструктивно сложного оборудования целесообразно проводить расчётную оценку его надёжности. Для возможности предварительной оценки надёжности БДМ профессором Каменевым А.Ф. разработана методика составления структурных схем надёжности БДМ и оценки уровня её надёжности как вероятности безотказной работы машины [4].

### Экономическая оценка при проектировании вариантов конструкции оборудования с разной надёжностью

Если имеются несколько вариантов перспективной конструкции (одинакового назначения, но с разной надёжностью), то оптимальным считается вариант, обеспечивающий минимальные затраты на весь жизненный цикл данной конструкции (например, машины).

Обычная зависимость затрат на весь жизненный цикл оборудования от уровня его надёжности имеет вид, показанный на рис. 6.2.

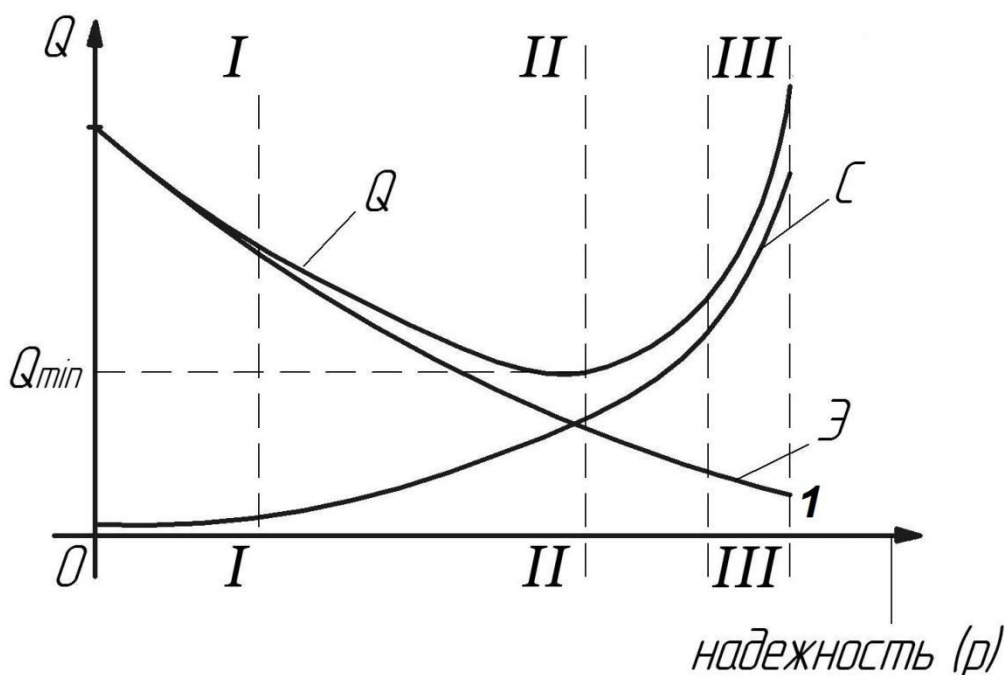


Рис. 6.2. Зависимость затрат на жизненный цикл оборудования от уровня его надёжности

Здесь  $Q$  - затраты на весь жизненный цикл;  
 $P$  - вероятность безотказной работы;  
 $C$  - затраты на создание оборудования;

Э - затраты на эксплуатацию оборудования.

Суммарные затраты  $Q$  на весь жизненный цикл оборудования складываются из затрат на его создание ( $C$ ) и на эксплуатацию ( $\text{Э}$ ) (рис.6.2):

$$Q=C+\text{Э}.$$

С повышением надежности затраты на эксплуатацию уменьшаются из-за снижения аварийности, и отсюда уменьшаются расходы на ремонт оборудования. Затраты на создание техники для повышения её надежности, наоборот, должны возрасти (например, из-за использования более дорогих высоконадёжных материалов, более современной технологии изготовления и т.д.).

Таким образом, если рассмотреть три варианта конструкций, имеющих разную надежность (варианты I,II,III), показанные на рис.6.2, то оптимальным является вариант II (при  $Q=Q_{min}$ ).

Всё вышеизложенное относится к обеспечению базовой надежности при разработке технического проекта оборудования. В техническом проекте разрабатываются общие виды оборудования, дающие полное представление о технических решениях, заложенных в проект.

На базе технического проекта разрабатывается рабочая проектная документация (рабочий проект). По чертежам рабочего проекта производятся изготовление и сборка оборудования.

Разработку рабочего проекта следует производить на заводе-изготовителе, поскольку здесь можно лучше использовать возможности данного завода для улучшения качества разрабатываемого оборудования (в том числе его надежности). Например, могут быть лучше использованы возможности завода по технологии изготовления, термообработке, по используемым материалам и др.

Здесь может также производиться обкатка изготовленного оборудования, его испытания на специальных стендах. При этом часто выявляются и устраняются различные скрытые дефекты изготовленных изделий, поэтому при установке их на месте будущей эксплуатации (например, на ЦБК) надежность оборудования будет более высокой.

При обеспечении базовой надежности оборудования также немаловажную роль играют монтаж, пуск и наладка оборудования.

## **6.2. Обеспечение эксплуатационной надёжности оборудования**

При эксплуатации оборудования (машин и аппаратов) для обеспечения его фактической надежности основным является следующее:

- эксплуатация в полном соответствии с требованиями системы технического обслуживания и ремонта (СТОиР в ЦБП);

- регулярный сбор данных по фактической надежности (и в целом по качеству работы) эксплуатируемой техники, выявление «слабых» мест в ней, по возможности их улучшение и устранение в ходе эксплуатации вплоть до модернизации оборудования.

Работу по второму направлению фактически можно расценивать как продолжение аналогичной работы по изучению надежности ближайшего прототипа перед началом разработки проектной документации. При этом на стадии эксплуатации также могут приниматься меры по дополнительному улучшению конструкции машин и аппаратов или применению более надежных материалов (износостойких, коррозионностойких) и т. д.

*Пример.* Повышение надежности корообдирочного барабана марки КБ-60 на Архангельском ЦБК.

По проекту НИИЦмаша переход между секциями корообдирочного барабана марки КБ-60 конструктивно был оформлен примерно так (рис. 6.3).

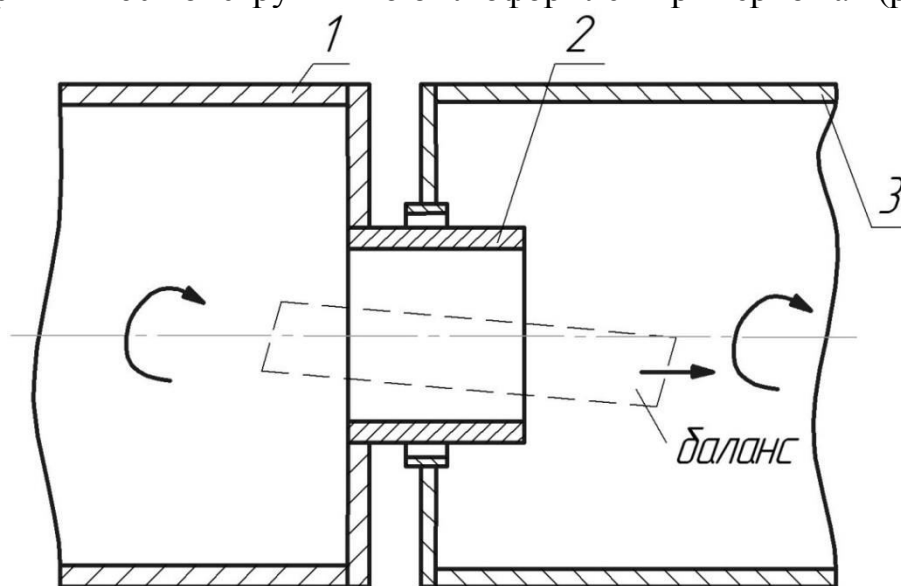


Рис. 6.3. Конструкция перехода между секциями корообдирочного барабана КБ-60 (по первоначальному проекту НИИЦмаша)

Эксплуатация этой конструкции показала её значительную аварийность из-за поломок в местах приварки переходного патрубка 2 к торцу предыдущей секции 1. Это можно объяснить значительным изгибающим моментом в указанном месте, создаваемым весом проходящего баланса и переходного патрубка, а также ударами баланса о патрубок из-за большого плеча этого момента, равного длине переходного патрубка.

Указанная конструкция в ходе её освоения на Архангельском ЦБК была улучшена за счет сдвига влево переходного патрубка 2 (рис. 6.4).

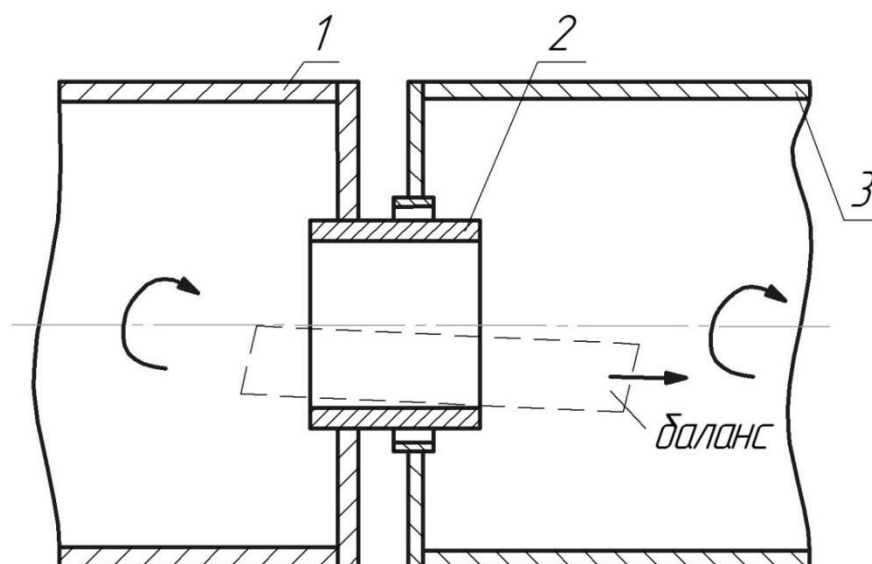


Рис. 6.4. Улучшенная конструкция перехода между секциями корообдирочного барабана КБ-60

Практика показала, что в улучшенном варианте указанная аварийность отсутствует за счет снижения величины изгибающего момента (вследствие уменьшения плеча момента) в месте приварки переходного патрубка.

Согласно ГОСТ 27.002-89 по основным терминам надежности имеем следующие формулировки, относящиеся к техническому обслуживанию и ремонту:

- техническое обслуживание - это комплекс работ и соответствующих норм и положений, направленных на поддержание работоспособности техники при эксплуатации (например, к ТО относятся такие работы на оборудовании, как смазка, подтяжка крепежа, подрегулировка механизмов и др.);
- ремонт - это комплекс работ и соответствующих норм и положений по восстановлению утраченной работоспособности техники.

В настоящее время известны три основные стратегии (системы) ремонта:

- 1) ремонт послеаварийный;
- 2) планово - предупредительный ремонт (ППР);
- 3) ремонт по потребности (или по фактическому состоянию техники).

**Ремонт послеаварийный** – это историческая наиболее ранняя система ремонта. При ней ремонт оборудования проводился только после отказов оборудования (например, машин и аппаратов). При этой системе ремонта по мере интенсификации режимов работы техники (повышения её рабочих скоростей, давлений, температур и др.) аварийность оборудования росла. Для снижения аварийности в начале XX века была предложена система ППР.



**Планово-предупредительный ремонт (ППР)** в промышленно развитых странах был введён в 20-30 гг. XX-го века (в СССР система ППР введена указом Совета Народных Комиссаров в 1923г.).

При этой системе проводится периодический контроль состояния техники при ревизиях (согласно плану) и при необходимости её профилактический ремонт для предупреждения возможных отказов техники (ремонт проводится по результатам ревизий).

Однако, система ППР не полностью устраняет аварийность промышленного оборудования (в основном из-за периодичности ревизий), поэтому в ней сохраняются элементы системы послеаварийного ремонта.

**Ремонт по потребности** предусматривает непрерывный контроль состояния работающей техники средствами технической диагностики (а также и органолептически). При таком контроле можно останавливать технику на ремонт лишь при его фактической необходимости. Внедрение системы ремонта по потребности в мире и в России показывает возможность дальнейшего значительного снижения аварийности оборудования (в том числе в ЦБП).

В начале внедрения третьей системы ремонта по данным непрерывного контроля состояния техники уточняются виды и объёмы работ при плановых остановках на ППР.

### **6.3. Математическое моделирование обеспечения надёжности техники**

В общем случае управление техническим состоянием оборудования, в том числе его надёжностью, на всём протяжении жизненного цикла оборудования можно представить в виде следующего схематического процесса.

Пусть качество работы оборудования (например, БДМ) характеризуется набором его выходных эксплуатационных параметров  $(y_1, y_2, \dots, y_n) = \bar{y}$ , где  $\bar{y}$ - вектор этих выходных эксплуатационных характеристик.

К таким выходным параметрам машины относятся, например, рабочая скорость машины, потребляемая мощность привода, характеристики надёжности машины, производительность машины, показатели качества продукции и др.

Выходные характеристики изделия (машины) зависят от:

- технического состояния машины;
- правильности технологического режима машины;
- качества используемого сырья;
- качества эксплуатации, ремонта, технического обслуживания и т.д.

Эти характеристики можно назвать задающими параметрами и обозначить как  $(x_1, x_2, \dots, x_m) = \bar{x}$ , где  $\bar{x}$  – вектор этих задающих характеристик.

В общем случае выходные параметры машины зависят от её задающих характеристик:

$$\bar{y} = \bar{y}(\bar{x}),$$

т. е. результат работы машины определяется её состоянием, технологическим режимом работы и т.д.

Векторы  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  можно объединить в единый вектор  $\bar{z}$ :

$$(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots) = (z_1, z_2, \dots, z_k) = \bar{z},$$

где  $\bar{z}$  – вектор технических характеристик машины.

При разработке новых машин на основе анализа работы аналогичного оборудования конструктор уточняет все технические характеристики будущей машины, при этом получается проектный вектор ее технических характеристик  $\bar{z}_0$ . При этом, если нужно, улучшаются (устраняются) «слабые» места у взятой за основу машины – прототипа. В результате можно сказать, что проектным характеристикам новой машины соответствует точка с вектором  $\bar{z}_0$  (или точка с координатами  $z_{0i}$ ) в  $k$ - мерном фазовом пространстве.

Для каждой координаты (параметра)  $z_i$  назначаются допустимые пределы её отклонений от номинального значения, таким образом, в  $k$ - мерном пространстве вокруг точки  $z_0$  задаётся область  $\bar{z}_0 \pm \Delta \bar{z}_0$ , которая называется областью работоспособного состояния машины (областью работоспособности). Вся остальная часть фазового пространства (с недопустимыми значениями параметров  $z_i$ )- это область отказов.

В случае  $k=2$  (для простоты) всё это можно показать графически (рис.6.5).

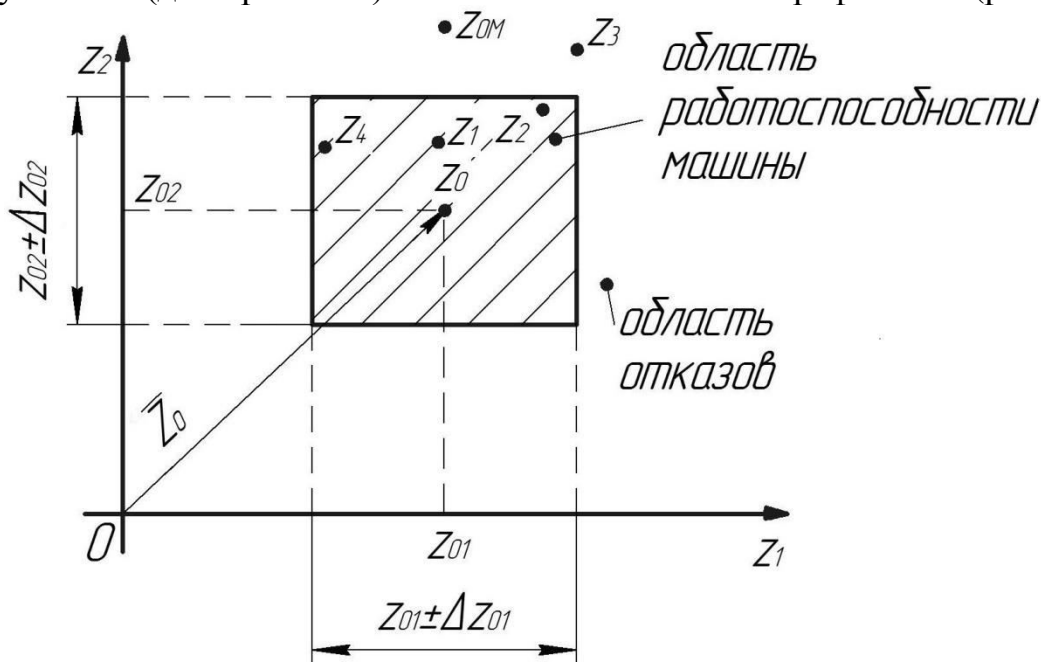


Рис. 6.5. Фазовое пространство технических характеристик машины (в частности, БДМ)

Здесь, например,  $z_{01}$ - рабочая скорость машины,  $z_{02}$ - показатель качества продукции (основной).

При изготовлении, монтаже и пусконаладочных работах стремятся обеспечить проектный вектор технических характеристик машины  $\bar{z}_0$ . Обычно

обеспечить  $\bar{Z}_0$  точно не удаётся, и фактически получается вектор  $\bar{Z}_1$  (точка  $Z_1$ ). При эксплуатации точка  $z_1$  уходит от первоначального положения, и получается вектор технических характеристик  $\bar{Z}_2$  (точка  $Z_2$ ) (при этом точка  $Z_2$  стремится выйти в область отказов). С целью недопущения этого проводятся работы по техническому обслуживанию (ТО) машины (смазка, промывка и т.д.), однако ТО не позволяет полностью исключить отказы машины. Поэтому для предотвращения отказов проводятся работы ППР (планово-предупредительного ремонта).

В какой-то момент времени ППР не полностью выполняет свои функции, происходит отказ машины (точка  $z_2$  на графике переходит в область отказов и занимает положение  $z_3$ ). Для устранения отказа далее проводится послеаварийный ремонт, и точка  $z_3$  возвращается в область работоспособности, занимая в ней, например, положение  $z_4$  и т.д.

Проектный уровень технических характеристик машины  $Z_0$  может быть в ходе эксплуатации улучшен путем модернизации машины, например, до уровня  $Z_{0M}$ .

Таким образом, видно, что обеспечение необходимого технического состояния машины, в том числе её надежности, требует проведения соответствующих мероприятий на протяжении всего жизненного цикла оборудования.

На стадиях создания техники (проектирования и изготовления) обеспечивается базовая надежность машины, на стадии эксплуатации - её эксплуатационная (фактическая) надежность.

### Библиографический список

1. Проников А.С. Надежность машин.- М.: Машиностроение, 1978.- 592 с.
2. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин - М.: Высшая школа, 1988.-238 с.
3. Кокушин Н.Н. Монтаж и ремонт целлюлозно- бумажного оборудования (учебник для вузов).- М.: Экология, 1991. – 208 с.
4. Каменев А.Ф. Основы надежности бумагоделательных машин.- М.: Лесная промышленность, 1978. – 144 с.
5. Основы теории надежности. Руководство для выполнения лабораторных работ по курсу.-СПб.: СПбГТУРП, 1999.-19 с.
6. Ермаков В.И., Шеин В.С. Ремонт и монтаж химического оборудования - Л.:Химия, 1981.-368 с.

7. ГОСТ 27.002-89 “Надёжность в технике. Основные понятия, термины, определения”.

## Оглавление

<b>1. Цели и задачи курса</b> .....	3
<b>2. Основные понятия и термины надёжности</b> .....	3
2.1. Технический объект, элемент, система.....	3
2.2. Состояния технических объектов.....	4
2.3. Надёжность технических объектов .....	4
2.3.1. Надёжность как свойство техники .....	5
2.3.2. Актуальность проблемы надёжности.....	6
2.3.3. Развитие науки о надёжности техники .....	7
2.3.4. Простые свойства надёжности.....	9
2.3.5. Надёжность как часть общей характеристики качества техники.....	10
2.4. Характеристика техники с точки зрения возможности и необходимости её ремонта и технического обслуживания.....	11
2.5. Резервирование техники.....	11
2.6. Отказы техники .....	13
2.6.1. Причины отказов техники .....	13
2.6.2. Виды отказов техники.....	15
2.6.3. Методы устранения отказов и их последствий .....	19
2.6.4. Некоторые характерные отказы машин и аппаратов. Закономерности распределения отказов .....	20
<b>3. Предмет науки о надёжности техники. Её цели и задачи</b> .....	27
<b>4. Надёжность целлюлозно-бумажного оборудования</b> .....	27
4.1. Надёжность бумагоделательных машин.....	28
4.2. Основные понятия и термины надёжности в применении к БДМ.....	29
4.2.1. Работоспособность и исправность БДМ.....	29
4.2.2. Надёжность БДМ.....	30
4.2.3. Простые свойства надёжности БДМ .....	30
4.2.4. Простые свойства надёжности элементов БДМ .....	32
4.2.5. Резервирование на БДМ .....	34
4.2.6. Функциональная избыточность на БДМ.....	35
4.2.7. Отказы БДМ (на БДМ).....	35

Причины отказов на БДМ .....	35
Примеры вторичных процессов на БДМ .....	36
Примеры отказов БДМ (на БДМ) .....	42
4.3. Надежность целлюлозного (и в целом химического) оборудования. Причины отказов этого оборудования .....	46
4.3.1. Виды коррозионного износа .....	47
Характеристика видов коррозионного износа .....	47
4.3.2. Надежность технологических линий химических (в том числе целлюлозно-бумажных) производств .....	49
Резервирование в технологических линиях .....	49
<b>5. Основные показатели надежности техники .....</b>	<b>50</b>
5.1. Единичные показатели надежности .....	51
5.2. Комплексные показатели надежности .....	54
<b>6. Обеспечение надежности на основных этапах жизненного цикла промышленного оборудования .....</b>	<b>56</b>
6.1. Обеспечение базовой надежности оборудования .....	57
6.2. Обеспечение эксплуатационной надежности оборудования .....	60
6.3. Математическое моделирование обеспечения надежности техники .....	63
Библиографический список .....	65