

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Л. Кавера

**БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В ГОРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Специальность: 21.05.04 «Горное дело»

Специализация: Технологическая безопасность и горноспасательное дело

РАССМОТРЕНО  
на заседании кафедры  
«Охрана труда и аэрология»  
02 февраля 2022 г. Протокол № 9

Донецк – 2022

УДК 622.232

Безопасность и надежность технологических процессов в горном производстве:  
конспект лекций / сост.: А.Л. Кавера – Донецк: ДОННТУ, 2022. – 43 с.

В конспекте лекций излагаются общие вопросы, связанные с безопасностью и надежностью техники и технологических процессов в горном деле. Конспект рекомендуется для подготовки студентов по специальности «Горное дело» со специализацией: «Технологическая безопасность и горноспасательное дело».

Составил: А.Л. Кавера, к.т.н., доц.

## СОДЕРЖАНИЕ:

1. Надежность, как научно-техническое направление .....	4
2. Основные понятия надежности. Классификация отказов. Составляющие надежности.....	6
2.1 Основные понятия.....	6
2.2 Классификация и характеристики отказов .....	8
2.3 Составляющие надежности.....	9
2.4 Основные показатели надежности .....	10
3. Анализ возможных отказов.....	12
4. Причины потери работоспособности технического объекта .....	15
4.1 Источники и причины изменения начальных параметров технической системы .....	15
4.2 Законы состояния и старения.....	17
4.3 Отказы, вызываемые общими причинами (множественные отказы) .....	21
5. Методы обеспечения надежности сложных систем .....	21
5.1 Конструктивные способы обеспечения надежности.....	21
5.2 Технологические способы обеспечения надежности изделий в процессе изготовления .....	22
5.3 Обеспечение надежности в условиях эксплуатации .....	23
5.4 Пути повышения надежности сложных технических систем при эксплуатации ...	25
5.5 Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надежности техники при эксплуатации .....	25
6. Испытания. Задачи и виды испытаний .....	27
7. Надежность системы «человек-машина» .....	30
8. Защита изделий от климатических воздействий.....	36
9. Причины отказов горных машин.....	40
10. Методы повышения надежности горного оборудования.....	41

## 1. НАДЕЖНОСТЬ, КАК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

«Надежность», как научно-техническое направление, прошло в своем развитии ряд этапов. Для обеспечения надежности уже в начале XX в. пользовались запасом прочности. Однако такой подход часто приводил к увеличению габаритов и массы изделий и, соответственно, к дополнительному расходу материалов. Стремление уменьшить нежелательные эффекты стимулировало изучение реальных нагрузок на изделие в эксплуатации, несущей способности материалов и конструкций, процессов изменения их состояния вследствие старения, усталости и других факторов. Основой решения задач по надежности явилась теория вероятностей и математическая статистика. На их базе уже в 1930-е годы была установлена статистическая природа коэффициентов запаса прочности и сформулировано понятие отказа, как превышение нагрузки над прочностью. В нашей стране программа электрификации дала толчок развитию идеи резервирования при параллельном использовании генераторов, трансформаторов и другого оборудования в процессе создания энергосистем, обеспечивающих бесперебойное снабжение электроэнергией все отрасли народного хозяйства.

Особенно бурное развитие теории надежности началось с интенсивным развитием электроники и автоматики, авиации и ракетно-космической техники. Полуэмпирические подходы к обеспечению надежности перестали удовлетворять требованиям практики, связанным с необходимостью уменьшения массы и габаритов аппаратуры, сокращением сроков проектирования и внедрения образцов новой техники. В сложившихся условиях возникли предпосылки к созданию нового научно-технического направления – теории надежности. Развитие этого направления можно разделить на три этапа: 50-е годы XX в. – становление направления; 60-е годы – этап классической теории надежности; с 70-х годов по настоящее время – этап системных методов надежности.

Первый этап в решении задач надежности – выяснение причин отказов оборудования. Было установлено, что основной причиной отказов радиоэлектронной аппаратуры является низкая надежность элементов. Перед разработчиками встали вопросы: каковы основные причины ненадежности элементов и возможны ли пути их устранения? Существуют ли способы создания надежных систем из ненадежных элементов? Можно ли прогнозировать надежность проектируемой системы? Ответ на поставленные вопросы потребовал изучения влияния на отказы эксплуатационных факторов (температуры, среды, вибраций, электрической нагрузки и пр.). В результате был собран богатый статистический материал для оценки характеристик надежности элементов в зависимости от нагрузок. В свою очередь развитие методов аналитического расчета надежности изделий позволило прогнозировать их надежность. Уже на этом этапе происходит перераспределение значимости источников ненадежности. Центр тяжести перемещается на механическое и электромеханическое оборудование, конструкцию, стыки оборудования, на обеспечение работы в недостаточно известных условиях. В 1953 г. появились первые контракты, требовавшие экспериментального подтверждения надежности аппаратуры. С этого момента начался переход ко второму этапу.

Критический анализ причин отказов при проведении большого числа испытаний на надежность показал их существенную зависимость от конструкции изделий, технологии производства и условий эксплуатации. Был сделан вывод, что

отказы имеют причины, которые можно обнаружить и устранить. В процессе работ на этом этапе проявились недостаточная эффективность выборочного контроля и статистических испытаний на надежность, не исключающих отказы техники при эксплуатации. В результате появились новые вопросы: как на ранних этапах создания систем заложить возможности обеспечения высокой надежности? Как соразмерить программу обеспечения надежности со степенью ответственности решаемых задач и с ожидаемым эффектом?

Начиная с 1968 г. происходит переход к третьему этапу. Национальным агентством по авиации и космическим исследованиям (NASA) был опубликован новый вариант требований к надежности, заложивший основу современных систем и программ обеспечения надежности. Среди них такие, как четкое планирование и эффективное руководство всеми работами, проводимыми в области обеспечения надежности; определение специальных задач надежности в процессе проектирования; оценка надежности (с учетом взаимного влияния документального и математического обеспечения) путем использования инженерного анализа, испытаний, экспериментальных оценок и прогнозирования; регулярная и своевременная информация о состоянии дел в области обеспечения надежности разрабатываемой системы. Основным отличием третьего этапа является сосредоточение основных усилий на качественных аспектах надежности, но это не исключает и количественные, составляющие основное содержание предыдущих этапов.

Типовая методика проведения мероприятий, связанных с обеспечением надежности, закреплена в многочисленных нормативно-технических документах по двум основным направлениям. Первое из них относится к потенциальной надежности, которая опирается на конструктивные методы (выбор материалов и запаса прочности, уменьшение взаимовлияния элементов конструкции и др.) и технологические (ужесточение допусков, повышение чистоты поверхности отдельных элементов конструкции и пр.). Второе направление относится к обеспечению эксплуатационной надежности, что в свою очередь зависит от стабилизации условий эксплуатации (термостатирование, защитные экраны, стабилизация напряжений и пр.) и технического обслуживания (ремонт и профилактика).

Следует отметить, что в сфере обеспечения безопасности долгое время господствовала концепция абсолютной безопасности, в рамках которой предполагалось, что детерминистские (*детерминистский – исход которого полностью определен алгоритмом*) расчеты при анализе максимальной проектной аварии и консервативный подход при выборе запасов прочности обеспечивают безопасность объекта при эксплуатации. Этим самым игнорировалась вероятностная природа инцидентов, обусловленных наложением ряда маловероятных факторов, которые не учитывались в расчете безопасности. Тому было несколько причин.

Во-первых, как правило, в сценариях развития аварий не принимались во внимание вероятные пути перерастания нарушений нормальной эксплуатации в аварию. Для того чтобы оценить необходимые запасы в соответствии с консервативным подходом, рассматривался единственный, но самый тяжелый сценарий, описываемый максимальной проектной аварией (МПА). Считалось, что при таком подходе последствия любой аварии не превысят некоторый предельный

ущерб, который уже закладывался в проект в расчете на МПА. То есть такой объект хотя и нельзя признать полностью безопасным, но последствия от его аварии достаточно четко ограничены.

Следует отметить, что аварии на четвертом блоке Чернобыльской АЭС (СССР) и при запуске челнока «Челленджер» (США) продемонстрировали неэффективность концепции абсолютной безопасности. Таким образом, данная методология стала неадекватна процессам, определяющим безопасность.

Во-вторых, для большинства технических систем не были определены специфические показатели безопасности, что препятствовало формированию целей управления и созданию необходимых потоков информации о безопасности. Более того, долгое время считалось безнравственным регламентировать риск в качестве показателя безопасности. В результате игнорировался принцип принятия решений на основе фактов.

Осознание обществом факта вероятностной природы аварий привело к смене концепций обеспечения безопасности. В результате в настоящее время в мире складывается концепция приемлемого риска, основу которой составляют методы вероятностного анализа безопасности. При этом предполагается, что нормативное (критериальное) значение риска является производным от уровня экономики страны. Чем выше уровень экономики, уровень производственных отношений, культура безопасности в стране, тем выше уровень предъявляемых обществом требований к безопасности потенциально опасных объектов, т.е. тем ниже значение приемлемого (допустимого) риска. По мере развития экономики требования к безопасности должны повышаться, а значение приемлемого риска – снижаться. Введение риска аварии в качестве универсальной характеристики безопасности означало в некотором смысле революцию во взглядах на управление безопасностью.

В то же время у определенной части инженерно-технической общественности наблюдалось скептическое отношение к вероятностным методам и результатам. Однако по мере совершенствования вероятностного анализа безопасности повышалась его эффективность, особенно в ситуациях, когда вероятностный анализ не подменял традиционные расчеты, а дополнял их.

Требования к безопасности изделия (технологического процесса) в целом трансформируются в требования к надежности составляющих его компонентов. Таким образом, методы теории надежности становятся поддерживающими технологиями и должны рассматриваться в тесной взаимосвязи с методами теории безопасности.

## **2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ. СОСТАВЛЯЮЩИЕ НАДЕЖНОСТИ**

### **2.1 Основные понятия**

Термины и определения, используемые в теории надежности, регламентированы ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Термины и определения».

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

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

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

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

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

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

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

**Работоспособность** – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных НТД. Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач.

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

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

Схема основных состояний технических изделий представлена на рис. 2.1.

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

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

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

В связи с этим, объекты могут быть:

- невозстанавливаемые, для которых работоспособность в случае возникновения отказа, не подлежит восстановлению (подшипники качения, полупроводниковые изделия, зубчатые колеса и т.п.);
- восстанавливаемые, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путем замены.

Объекты, состоящие из многих элементов, например, станок, автомобиль, электронная аппаратура, являются восстанавливаемыми, поскольку их отказы связаны с повреждениями одного или немногих элементов, которые могут быть заменены.

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



Рис. 2.1 – Схема основных состояний технических изделий

## 2.2 Классификация и характеристики отказов

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

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

По **типу** отказы подразделяются на:

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

По своей **природе** отказы могут быть:

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

Основные **признаки** классификации отказов: характер возникновения, причина возникновения, характер устранения, последствия отказов, дальнейшее использование объекта, легкость обнаружения, время возникновения.

Рассмотрим подробнее каждый из классификационных признаков.

**Характер возникновения:**

- внезапный отказ – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта;

– постепенный отказ – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта.

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

Постепенные отказы – связаны с износом деталей и старением материалов.

**Причина возникновения:**

- конструкционный отказ, вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта;
- эксплуатационный отказ, вызванный нарушением правил эксплуатации;
- производственный отказ, связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии;

**Характер устранения:**

- устойчивый отказ;
- перемежающийся отказ (возникающий/исчезающий).

**Последствия отказа:**

- легкий отказ (легкоустраняемый);
- средний отказ (не вызывающий отказы смежных узлов – вторичные отказы);
- тяжелый отказ (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека).

**Легкость обнаружения:**

- очевидные (явные) отказы;
- скрытые (неявные) отказы.

**Время возникновения:**

- приработочные отказы, возникающие в начальный период эксплуатации;
- отказы при нормальной эксплуатации;
- износные отказы, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и пр.

## 2.3 Составляющие надежности

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

**Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени. *Наработка* – продолжительность или объем работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения, километры пробега и т. п.).

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

**Ремонтпригодность** – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения

отказов, поддержанию и восстановлению работоспособности путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

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

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

## 2.4 Основные показатели надежности

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

В зависимости от способа получения показатели подразделяют на расчетные, получаемые расчетными методами; экспериментальные, определяемые по данным испытаний; эксплуатационные, получаемые по данным эксплуатации.

В зависимости от области использования различают показатели надежности нормативные и оценочные. Нормативными называют показатели надежности, регламентированные в нормативно-технической или конструкторской документации. К оценочным относят фактические значения показателей надежности опытных образцов и серийной продукции, получаемые по результатам испытаний или эксплуатации.

К показателям безотказности относятся:

**вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает;

**средняя наработка до отказа** – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа;

**средняя наработка на отказ** – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки;

**интенсивность отказов** – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Этот показатель относится к невосстанавливаемым изделиям.

К показателям долговечности относятся:

а) показатели, связанные с ресурсом изделия:

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

невосстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

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

Единицы для измерения ресурса выбирают применительно к каждой отрасли и к каждому классу машин, агрегатов и конструкций отдельно. В качестве меры продолжительности эксплуатации может быть выбран любой неубывающий параметр, характеризующий продолжительность эксплуатации объекта (для самолетов и авиационных двигателей естественной мерой ресурса служит налет в часах, для автомобилей – пробег в километрах, для прокатных станков – масса прокатанного металла в тоннах).

б) показатели, связанные со сроком службы изделия:

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

На рис. 2.2 приведена графическая интерпретация перечисленных показателей, при этом:

$t_0 = 0$  – начало эксплуатации;

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

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

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

$t_9$  – момент прекращения эксплуатации;

$t_{10}$  – момент отказа объекта.

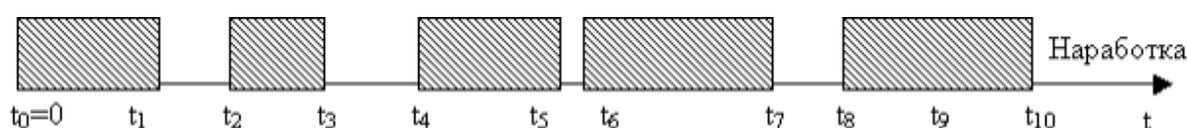


Рис. 2.2 – Графическая интерпретация показателей надежности

Технический ресурс составит:

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

Назначенный ресурс составит:

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

Срок службы объекта составит:

$$ТС = t_{10}.$$

Показатели долговечности, выраженные в календарном времени работы, позволяют непосредственно использовать их в планировании сроков организации ремонтов, поставки запасных частей, сроков замены оборудования. Недостаток этих показателей заключается в том, что они не позволяют учитывать интенсивность использования оборудования.

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

Существуют также **комплексные** показатели надежности. Например, **коэффициент технического использования** – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и всех простоев для ремонта и

технического обслуживания. А коэффициент технического использования, взятый за период между плановыми ремонтами и техническим обслуживанием, называется **коэффициентом готовности**, который оценивает непредусмотренные остановки машины и что плановые ремонты и мероприятия по техническому обслуживанию не полностью выполняют свою роль.

При выборе того или иного показателя надежности для изделия должен быть выбран характерный временной режим эксплуатации:

1. непрерывный, при котором период действия длится непрерывно;
2. циклический, при котором периоды действия и простоя чередуются с постоянной циклическостью;
3. оперативный, когда неопределенный период простоя сменяется периодом действия заданной продолжительности;
4. общий, при котором периоды действия и простоя чередуются случайным образом.

### **3. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ОТКАЗОВ**

Анализом возможных отказов изделия или его элементов называют оценку влияния возможных отказов элементов следующего уровня структуры на выходные характеристики исследуемого изделия и определение перечня его возможных отказов. Возможным отказом изделия называют состояние, в которое может перейти изделие за время эксплуатации, при возникновении отказов, входящих в него элементов следующего уровня структуры. Совокупность возможных отказов называют перечнем возможных отказов.

Анализ возможных отказов проводят с целью определения последствий отдельных видов отказов, времени их возникновения, выбора методов обнаружения, оценки вероятности возникновения, выявления и разработки предупредительных, контрольных и защитных мероприятий по обеспечению надежности.

В зависимости от стадии создания изделия и глубины его конструкторской проработки, анализ возможных отказов проводят с использованием различных источников информации. На ранних этапах проектирования для проектного анализа возможных отказов используют данные ТЗ на разработку изделия, проектные проработки структуры, конструкции и схемы эксплуатации изделия, опыт создания и эксплуатации изделий-аналогов. На завершающих этапах создания изделия при проведении поверочного анализа возможных отказов используют дополнительно принципиальные схемы, циклограммы функционирования, конструкторскую документацию, результаты статистической обработки измерений выходных параметров при испытаниях.

Анализ возможных отказов предусматривает следующие этапы:

- анализ процесса эксплуатации изделия и составление перечня периодов эксплуатации;
- составление перечня возможных отказов для каждого периода эксплуатации;
- определение возможных причин и последствий отказов, возможности их обнаружения и устранения (или уменьшения степени опасности), а также оценка вероятностных и временных характеристик каждого вида отказов из перечня возможных отказов;

- анализ критичности отказов и ранжирование отказов по важности.

Анализ возможных отказов должен удовлетворять следующим требованиям, выполнение которых в значительной мере повышает качество проводимых испытаний:

- проводиться с достаточной степенью полноты и детализации;
- учитывать физическую природу процессов, протекающих в изделии;
- учитывать взаимовлияние отказов, различные режимы работы элементов изделия, возможные отказы межсистемных связей (соединений);
- обеспечивать согласованность параметров элементов изделий.

Анализ процесса эксплуатации изделия позволяет получить необходимые сведения для выявления возможных отказов. Его проводят в следующем порядке:

- определяют назначение изделия, особенности его эксплуатации и перечень выполняемых задач;

- выделяют основные, обеспечивающие и вспомогательные функции изделия. К основным относят функции, определяющие целевое назначение изделия, указанное в ТЗ. Обеспечивающими являются функции, выполнение которых необходимо для выполнения основных функций. К вспомогательным относят функции, которые не оказывают непосредственного влияния на выполнение целевых задач, но отсутствие которых может осложнить их решение;

- для каждой выделенной функции определяют взаимно однозначные группы статистически независимых выходных параметров, номинальные и предельно допустимые значения каждого параметра;

- определяют виды элементов изделия, их функциональные особенности и характер взаимодействия при эксплуатации, наличие резервных элементов, выявляют элементы, не имеющие аналогов;

- определяют особенности эксплуатации изделия (основные и резервные режимы эксплуатации, возможности работы с измененными выходными параметрами и т.д.);

- определяют продолжительность каждого периода эксплуатации.

**Составление перечня возможных отказов.** Перечень возможных отказов должен обладать достаточной полнотой, определяемой наличием наиболее вероятных и критичных (приводящих к наиболее тяжелым последствиям) отказов, но не может быть избыточным из-за включения в него зависимых отказов. Отказы, возникающие по одной и той же причине, могут быть объединены.

Общее число возможных отказов в перечне складывается из общего числа всех выделенных условных независимых параметров по каждой функции изделия с учетом возможного числа нарушений предельно допустимых значений по каждому параметру. При составлении перечня анализируют также ограничения на условия применения изделия, нарушения которых рассматривают как возможные отказы. Далее уточняют перечень при проведении анализа причин, оценке вероятностей возникновения, возможностей обнаружения отказов и их последствий. Перечни возможных отказов и их причин оформляют в виде таблиц.

**Определение причин возникновения отказов.** Причины каждого из возможных отказов определяют двумя дополняющими друг друга методами анализа: методом структурных схем надежности (метод «снизу вверх») и методом «дерева отказов» (методом «сверху вниз»).

Метод структурных схем надежности заключается в последовательном преобразовании параллельных и последовательных участков структурной схемы надежности эквивалентными блоками до сведения ее к одному блоку. Основной принцип метода заключается в последовательной постановке вопроса, к какому событию в процессе работы изделия (его элементов) приводит отказ элемента следующего уровня структуры, т.е. в осуществлении анализа «снизу вверх».

Анализ проводят следующим образом. Составляют перечни возможных состояний элементов (начиная с механических элементов, приборов, агрегатов и т.д., число возможных состояний которых невелико). Далее для элементов более высокого уровня структуры или для изделия в целом определяют вектор основных технических параметров и значения этого вектора для каждого из возможных (рассматриваемых) состояний элементов более низкого уровня структуры.

Метод «дерева отказов» заключается в построении и анализе модели надежности, представляющей собой логико-вероятностную модель причинно-следственных связей отказов изделия с отказами его элементов и другими событиями (воздействиями). Основной принцип построения «дерева отказов» заключается в последовательной постановке вопроса: по каким причинам может произойти отказ изделия, т.е. в осуществлении анализа «сверху вниз».

Структурными элементами «дерева отказов» являются события, связанные между собой логическими операторами («и», «или», «не» и др.).

При использовании «дерева отказов» применяют следующие основные понятия:

- результирующее событие – нежелательное событие (конкретный вид отказа изделия из перечня возможных отказов), анализ которого проводится;
- промежуточное событие – сложное событие с логическим оператором, являющееся одной из возможных причин результирующего события. Его выявляют в ходе анализа причин результирующего события и подвергают дальнейшему анализу;
- базовое событие – простое событие, отказ которого не анализируется в связи с наличием достаточного числа данных;
- неполное событие – недостаточно детально разработанное событие, которое дальше не анализируется из-за невозможности или отсутствия необходимости проведения его анализа;
- логический оператор «и» (схема совпадения), означающий наличие события на выходе только при наличии событий на всех входах;
- логический оператор «или» (схема объединения), означающий наличие события на выходе при наличии хотя бы одного события на его входе.

Соответственно каждому виду события и оператора присваиваются символы, которые используются для графического построения «дерева отказов».

Исходными данными при построении «дерева отказов» являются перечни возможных видов отказов и их причин, нерасчетные значения внешних воздействующих факторов и др.

Методом «дерева отказов» проводится качественный и количественный анализ отказов. В результате качественного анализа определяют виды и причины отказов, степень защищенности изделия от конкретных видов отказов причины возникновения двух и более видов отказов, проводят ранжирование причин отказов по важности (по влиянию на возникновение отказа изделия).

Количественный анализ отказов изделий и их причин методом «дерева отказов» заключается в определении вероятностных характеристик отказов изделия (результатирующего события) по вероятностным характеристикам базовых и неполных событий.

По результатам количественного анализа могут быть проведены корректирование перечня возможных отказов изделий. в перечень вводятся критические виды отказов, которые имеют наибольшую вероятность появления, а также отказы, анализ которых затруднен.

Анализ возможностей обнаружения отказов проводят в следующем порядке:

- определяют характерные признаки отказа;
- оценивают минимальное время изменения выходного параметра от номинального значения до предельно допустимого;
- определяют контролируемые параметры для системы контроля и прогнозирования технического состояния;
- подразделяют отказы на внезапные и постепенные в зависимости от возможности их прогнозирования.

В заключение проводят общий анализ уровня критичности отказов. Он представляет собой окончательное ранжирование отказов по уровню критичности. Отказ считают по сравнению с другими более критичным, если его предпочтительнее рассматривать в первую очередь при разработке мер по обеспечению надежности. При сравнительной оценке критичности отказов учитывают последствия отказа, вероятность возникновения, время развития, возможность обнаружения и локализации и др.

Результаты анализа возможных отказов целесообразно оформлять в виде таблиц.

Анализ возможных отказов является весьма эффективным инструментом для разработки мероприятий по обеспечению надежности сложных систем, особенно в тех случаях, когда в их составе имеется много новых элементов.

## **4. ПРИЧИНЫ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

### **4.1 Источники и причины изменения начальных параметров технической системы**

Те изменения, которые происходят с течением времени в любой технической системе и приводят к потере ее работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями, которым она подвергается. В процессе эксплуатации на систему действуют все виды энергии, что может привести к изменению параметров отдельных элементов, механизмов и системы в целом. При этом имеется три основных источника воздействий:

1. действие энергии окружающей среды, включая человека, исполняющего функции оператора или ремонтника;
2. внутренние источники энергии, связанные как с рабочими процессами, протекающими в технической системе, так и с работой отдельных элементов системы;

3. потенциальная энергия, которая накоплена в материалах и деталях узлов системы в процессе их изготовления (внутренние напряжения в отливке, монтажные напряжения).

При работе технического объекта наблюдаются следующие основные виды энергии, влияющие на его работоспособность.

**Механическая энергия**, которая не только передается по всем элементам системы в процессе работы, но и воздействует на нее в виде статических или динамических нагрузок от взаимодействия с внешней средой.

Силы, возникающие в узлах технической системы, определяются характером рабочего процесса, инерцией перемещающихся частей, трением в кинематических парах. Эти силы являются случайными функциями времени. Природа их возникновения, как правило, связана со сложными физическими явлениями.

Механическая энергия в системе может возникнуть и как следствие тех затрат энергии, которые имели место при изготовлении отдельных частей системы и сохранились в них в потенциальной форме. Например, деформация частей при перераспределении внутренних напряжений, изменение объема детали после ее термической обработки происходят без всяких внешних воздействий.

**Тепловая энергия** действует на систему и ее части при колебаниях температуры окружающей среды, при осуществлении рабочего процесса (особенно сильные тепловые воздействия имеют место при работе двигателей и ряда технологических машин), при работе приводных механизмов, электротехнических и гидравлических устройств.

**Химическая энергия** также оказывает влияние на работу системы. Даже воздух, который содержит влагу и агрессивные составляющие, может вызвать коррозию отдельных узлов системы.

Если же оборудование системы работает в условиях агрессивных сред (оборудование химической промышленности, суда, многие машины текстильной промышленности и др.), то химические воздействия вызывают процессы, приводящие к разрушению отдельных элементов и узлов системы.

**Ядерная (атомная) энергия**, выделяющаяся в процессе превращения атомных ядер, может воздействовать на материалы (особенно в космосе), изменяя их свойства.

**Электромагнитная энергия** в виде радиоволн (электромагнитных колебаний) пронизывает все пространство вокруг объекта и может оказать влияние на работу электронной аппаратуры.

**Биологические факторы** также могут влиять на работоспособность системы. Например, в тропических странах имеются микроорганизмы, которые не только разрушают некоторые виды пластмасс, но даже могут воздействовать на металл.

Различные виды энергии, действуя на систему, вызывают в ее узлах и деталях процессы, снижающие начальные параметры изделия. Эти процессы связаны, как правило, со сложными физико-химическими явлениями и приводят к деформации, износу, поломке, коррозии и другим видам повреждений. Это, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных параметров изделия, что может привести к отказу.

Процессы, приводящие к изменению начальных свойств изделия, протекают в материалах, из которых создано изделие, включая не только детали машины, но и топливо, смазочные материалы, которые участвуют в рабочем процессе. Приведем примеры этих взаимосвязей. Механическая энергия, действующая в звеньях

металлорежущего станка, приводит к возникновению процесса износа его звеньев. Это вызывает искажение начальной формы сопряжения (т. е. их повреждение), что приводит к потере станком точности, которая является основным выходным параметром станка. При достижении определенной погрешности обработки возникает отказ.

Химическая энергия вызывает процессы коррозии в резервуарах и трубопроводах агрегатов химической промышленности. Повреждение стенок резервуаров может привести вначале к ухудшению выходных параметров агрегата (загрязнение химических веществ, изменение пропускных сечений трубопроводов), а затем при разрушении стенок к полному выходу из строя изделия.

Сочетание механических воздействий в том числе высокочастотных колебаний, а также влияние температурных и химических факторов на элементы конструкции приводит к тому, что в них могут возникнуть усталостные разрушения (трещины). Они снижают несущую способность системы, что при определенной величине повреждения приводит к разрушению элемента конструкции и может закончиться аварией.

Процесс, возникающий в результате действия того или иного вида энергии, может не сразу привести к повреждению изделия. Часто существует период «накопления воздействий» прежде, чем начнется период внешнего проявления процесса, т. е. повреждение изделия. Например, для начала развития усталостной трещины необходимо определенное число циклов переменных напряжений.

Повреждение материала изделия – это отклонение его контролируемых свойств от начальных, оно связано с выходными параметрами изделия определенной зависимостью. Не всякое повреждение влияет на выходные параметры изделия. Также и определенная степень этого повреждения может не повлиять на показатели работоспособности.

В надежности машин часто пользуются понятием *дефекта*, т. е. такого состояния изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации, однако остается работоспособным. При этом дефект рассматривается как возможная причина отказа. Понятие дефекта следует относить только к результату технологического процесса, а понятие повреждения – к результату воздействий на систему при ее эксплуатации. При этом необходимо рассматривать не только факт возникновения повреждений, но и оценить степень этого повреждения. При достижении некоторого максимального значения степени повреждения наступает отказ изделия.

#### **4.2 Законы состояния и старения**

Как физические законы, так и полученные на их основе частные зависимости, описывающие изменение свойств и состояния материалов, можно разделить на две основные группы.

Во-первых, это закономерности, описывающие взаимосвязи обратимых процессов, когда после прекращения действия внешних факторов материал (и соответственно деталь) возвращается в исходное состояние. Эти зависимости называются законами состояния.

Во-вторых, имеются закономерности, которые описывают необратимые процессы и, следовательно, позволяют оценить те изменения начальных свойств

материалов, которые происходят или могут происходить в процессе эксплуатации изделия. Эти зависимости называются законами старения.

Законы **состояния** можно разделить на *статические*, когда в функциональную зависимость, описывающую связь между входными и выходными параметрами, фактор времени не входит, и на *переходные* процессы, где учитывается изменение выходных параметров во времени.

Типичными примерами статических законов состояния могут служить закон Гука, закон теплового расширения твердых тел и др. Статические законы, описывающие изменения состояния изделия, хотя и не включают фактор времени, но могут быть использованы для расчетов надежности, если известны изменения характеристик изделия в процессе эксплуатации.

Законы состояния, описывающие переходные процессы, например колебания упругих систем, процессы теплопередачи и другие, хотя и включают фактор времени, но также не учитывают изменений, происходящих при эксплуатации изделий. Обычно они относятся к категории быстропротекающих процессов или процессов средней скорости. Лишь при известном изменении уровня внешних воздействий их можно использовать для решения задач надежности.

Для оценки надежности изделия необходимо знать скорость протекания процессов, снижающих его работоспособность.

Быстропротекающие процессы имеют периодичность изменения, измеряемую обычно долями секунды. Эти процессы заканчиваются в пределах цикла работы машины и вновь возникают при следующем цикле. Сюда относят вибрации узлов, изменения Сид трения в подвижных соединениях, колебания рабочих нагрузок и другие процессы, влияющие на взаимное положение узлов машины в каждый момент времени и искажающие цикл ее работы.

Процессы средней скорости связаны с периодом непрерывной работы машины. Их длительность измеряется обычно в минутах или часах. Они приводят к монотонному изменению начальных параметров машины. К этой категории относят как обратимые процессы (изменение температуры самой машины и окружающей среды, изменение влажности среды), так и необратимые (износ режущего инструмента, который протекает во много раз интенсивнее, чем изнашивание деталей и узлов машины).

Медленные процессы протекают за время работы машины между периодическими осмотрами или ремонтами. Они длятся дни и месяцы. К таким процессам относят обратимые процессы, например, сезонные изменения температуры, но в основном это необратимые процессы **старения** – изнашивание основных механизмов машины, перераспределение внутренних напряжений в деталях, ползучесть металлов, загрязнение поверхностей трения, коррозия.

Эти процессы также влияют на точность, мощность, КПД и другие параметры машин, но изменения их происходят очень медленно. Обычные методы борьбы с медленными процессами – ремонт и профилактические мероприятия, которые проводятся через определенные промежутки времени.

Протекание в машине процессов старения является одной из основных причин потери ею работоспособности.

В таблице 4.1 дана квалификация процессов старения по их внешнему проявлению и указаны основные разновидности каждого процесса.

Таблица 4.1 – Классификация процессов старения (необратимые процессы)

Объект		Внешнее проявление процессов (вид повреждения)	Разновидности процесса
Тело детали (объемные явления)		Разрушение	Хрупкое разрушение, вязкое разрушение
		Деформация	Пластическая деформация, коробление
		Изменение свойств материала	Изменение структуры материала, механических свойств (пластичность), химического состава, магнитных свойств, газопроницаемости, загрязнение жидкостей (смазочного материала, топлива)
Поверхность (поверхностные явления)	Детали	Разъединение	Коррозия, эрозия, кавитация, прогар, трещинообразование
		Нарост	Налипание (адгезия, когезия*, адсорбция**, диффузия), нагар, зарастивание
		Изменение свойств поверхностного слоя	Изменение шероховатости, твердости, отражательной способности, напряженного состояния
	Пáры	Износ	Износ (истирание), усталость поверхностных слоев, смятие, перенос материала
		Изменение условий контакта	Изменение площади контакта, глубины внедрения микровыступов, сплошности смазочного материала, коэффициента трения

\*когезия – связь между одинаковыми микрочастицами внутри тела в пределах одной фазы. Она характеризует прочность тела и его способность противостоять внешнему воздействию;

\*\*адсорбция – увеличение концентрации растворенного вещества у поверхности раздела двух фаз.

Любой процесс старения возникает и развивается лишь при определенных внешних условиях. Для оценки возможных видов повреждения материалов деталей машин необходимо установить область существования процесса старения и в первую очередь условия его возникновения. Для возникновения процесса обычно должен быть превзойден определенный уровень нагрузок, скоростей, температур или других параметров, определяющих его протекание. Этот начальный уровень или порог чувствительности особенно важно знать для быстропротекающих процессов старения, когда после возникновения процесса идет его интенсивное лавинообразное развитие. Часто порог чувствительности связывают с некоторым энергетическим уровнем, который определяет начало данного процесса.

Тело детали может подвергаться разрушению, которое является наиболее опасным проявлением процессов старения, деформироваться или изменять свойства материала – его пластичность, электропроводимость, магнитные свойства и т.п.

Наиболее часто процессы старения протекают в поверхностных слоях. При этом поверхность детали может подвергаться температурным, химическим, механическим или иным воздействиям внешней среды. В результате могут происходить явления, связанные с потерей (отделением) материала поверхности

вследствие коррозии, эрозии, кавитации и других процессов, которые можно объединить одним термином – разьединение поверхности.

На поверхности могут протекать и такие процессы, как адгезия, абсорбция, нагар и другие, которые характеризуются присоединением к поверхности других материалов. Их будем называть наростом. В результате внешних воздействий возможно также изменение свойств поверхностного слоя – его микрогеометрии, твердости, отражательной способности и др.

Чтобы оценить запас надежности детали, необходимо численно определить степень ее повреждения.

Существуют два основных метода оценки степени повреждения.

При первом методе выбирают численные критерии для непосредственного измерения степени повреждения изделия, например, величины деформации детали, ее линейного или весового износа, глубины и размеров каверн при локальном разрушении поверхности и т.п. Однако во многих случаях, особенно при локальных видах повреждения, бывает трудно непосредственно оценить степень повреждения.

В этом случае применяют второй метод, когда о повреждении судят по изменению выходного параметра. Например, при местных повреждениях детали или при возникновении пластических зон, о степени повреждения судят по потере несущей способности (прочности); о локальных повреждениях направляющего гидрораспределителя судят по падению давления и т.п.

Показатели, которые используют для определения степени повреждения материала изделия, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Показатели степени повреждения материала изделия

Повреждение		Методы оценки степени повреждения		
		интегральный	дифференциальный	По выходным параметрам изделия
Глубинное		Ослабление сечения трещинами (фактическая площадь сечения). Суммарная деформация детали. Число дислокаций в опасном сечении.	Размер трещин и их распределение. Эпюра деформаций. Распределение дислокаций по объему детали.	Потеря несущей способности детали.
Поверхностное	Полное	Весовой износ. Средний износ. Объемный показатель коррозии.	Линейный износ поверхности. Глубинный показатель коррозии. Изменение твердости по поверхности.	Изменение температуры, коэффициента трения, утечек, плотности, давления, вибраций.
	Локальное	Суммарная площадь повреждения. Число дефектов на единицу площади. Размеры наибольшего повреждения.	Законы распределения параметров, характеризующих отдельные повреждения. Плотность повреждения на отдельных участках поверхности.	

Оценка степени повреждения материала изделия и изучение закономерностей процессов старения, приводящих к данным повреждениям, являются основной для построения моделей расчета и прогнозирования надежности механических систем.

#### **4.3 Отказы, вызываемые общими причинами (множественные отказы)**

Множественный отказ есть событие, при котором несколько элементов выходят из строя по одной и той же причине. К числу таких причин могут быть отнесены следующие:

- **конструкторские недоработки оборудования** (дефекты, не выявленные на стадии проектирования и приводящие к отказам вследствие взаимной зависимости между электрическими и механическими подсистемами или элементами избыточной системы);

- **ошибки эксплуатации и технического обслуживания** (неправильная регулировка или калибровка, небрежность оператора, неправильное обращение и т. д.);

- **воздействие окружающей среды** (пыль, грязь, температура, вибрация, а также экстремальные режимы нормальной эксплуатации);

- **внешнее катастрофическое воздействие** (естественные внешние явления, такие, как наводнение, землетрясение, пожар, ураган);

- **общий изготовитель** (резервируемое оборудование или его компоненты, поставляемые одним и тем же изготовителем, могут иметь общие конструктивные или производственные дефекты. Например, производственные дефекты могут быть вызваны неправильным выбором материала, ошибками в схемах монтажа, некачественной пайкой и т. п.);

- **общий внешний источник питания** (общий источник питания для основного и резервного оборудования, резервируемых подсистем или элементов);

- **неправильное функционирование** (неверно выбранный комплекс измерительных приборов или неудовлетворительно спланированные меры защиты).

Известен целый ряд примеров множественных отказов атомных электростанций. Так, некоторые параллельно соединенные пружинные реле выходили из строя одновременно и их отказы были вызваны общей причиной; вследствие неправильного расцепления муфт при техническом обслуживании два клапана оказались установленными в неправильное положение; из-за разрушения паропровода имели место сразу несколько отказов коммуникационного щита. В некоторых случаях общая причина вызывает не полный отказ резервированной системы (одновременный отказ нескольких узлов, т.е. предельный случай), а менее серьезное общее понижение надежности, что приводит к повышению вероятности совместного отказа узлов системы.

## **5. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

### **5.1 Конструктивные способы обеспечения надежности**

Одной из важнейших характеристик сложных технических систем является их надежность. Требования к количественным показателям надежности возрастают тогда, когда отказы технической системы приводят к большим затратам материальных средств, либо угрожают безопасности (например, при создании атомных лодок, самолетов или изделий военной техники). Один из разделов

технического задания на разработку системы – раздел, определяющий требования к надежности. В этом разделе указывают количественные показатели надежности, которые необходимо подтверждать на каждом этапе создания системы.

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

Важное место в обеспечении надежности системы занимает подбор металла, из которого конструируют силовые узлы металлоконструкций, так как от несущих конструкций зависит надежность и долговечность изделия. Для изделий, работающих в стационарных условиях, чаще всего используют обычные углеродистые стали, а для изделий, работающих в условиях переменных нагрузок с высокой интенсивностью, – высоколегированные. В зависимости от внешних воздействующих факторов и условий нагружения подбирают соответствующие материалы с определенными характеристиками.

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

Наряду с конструктивными методами, обеспечивающими работоспособность системы, широко применяют вероятностные методы оценки ее надежности на этапах эскизного и рабочего проектирования. С целью определения количественных показателей надежности составляют функциональную схему и циклограмму работы системы во времени при ее эксплуатации. Более полному пониманию работы системы способствует принципиальная схема, в которой подробно описывают соединение узлов и элементов, а также их назначение. На основании функциональной и принципиальной схем работы системы составляют структурную схему надежности с указанием резервирования отдельных элементов, узлов и каналов. На основании структурной схемы надежности составляют перечень элементов и узлов с указанием интенсивностей отказов, взятых из справочной литературы или полученных по результатам испытаний или эксплуатации. Далее на основании исходных данных выполняют расчет проектной надежности системы.

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

## **5.2 Технологические способы обеспечения надежности изделий в процессе изготовления**

Одним из основных мероприятий на стадии серийного производства, направленных на обеспечение надежности технических систем, является

стабильность технологических процессов. Научно обоснованные методы управления качеством продукции позволяют своевременно давать заключение о качестве выпускаемых изделий. На предприятиях промышленности применяют два метода статистического контроля качества: текущий контроль технологического процесса и выборочный метод контроля.

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

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

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

Расчетно-статистическим методом определяют коэффициент точности ( $K_T$ ) и коэффициент смещения ( $K_C$ ).

**Коэффициент точности** характеризует соотношение полей допуска исследуемого параметра (размера) и величиной рассеяния размеров деталей в партии. Его значение определяют по формуле

$$K_T = T/\omega,$$

где  $T$  – допуск;

$\omega$  – поле рассеяния контролируемого параметра в соответствующей выборке.

**Коэффициент смещения** характеризует относительную величину смещения центра рассеяния размеров от середины поля допуска

$$K_C = (x - \Delta_0)/2,$$

где  $x$  – среднее арифметическое значение центра рассеяния;

$\Delta_0$  – координата середины поля допуска.

$$\Delta_0 = (T_n + T_v)/2,$$

где  $T_n$  и  $T_v$  – нижнее и верхнее предельные отклонения параметра.

В случае, если коэффициент  $K_T > 1$ , то точность технологического процесса хорошая, если  $K_T = 0,95 \div 1$ , то точность удовлетворительная, при  $K_T \leq 0,9 \div 0,7$ , точность неудовлетворительная.

### 5.3 Обеспечение надежности в условиях эксплуатации

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

В процессе эксплуатации отказы системы принято подразделять на две основные категории — внезапные отказы и постепенные.

**Внезапные отказы** связаны с наличием в изделии скрытых производственных дефектов, причинами конструктивного характера, ошибками обслуживающего персонала.

**Постепенные отказы** системы обусловлены постепенными изменениями параметров. Такое изменение параметров в основном вызвано старением элементной базы системы.

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

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3,$$

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

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

$$P_2 = \prod_{i=1}^n P_i$$

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

По мере совершенствования обслуживания значение вероятности безотказной работы  $P_2$  приближается к единице.

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

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

Используя накопленный опыт, можно всегда выбрать тот или иной объем функционирования, который обеспечит нормальную работу системы до очередного технического обслуживания с заданной вероятностью безотказной работы. Или, наоборот, задаваясь последовательностью объемов функционирования, можно определить приемлемые сроки проведения технического обслуживания, обеспечивающего работу системы на заданном уровне надежности.

#### **5.4 Пути повышения надежности сложных технических систем при эксплуатации**

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

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

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

Большое значение имеет правильная организация сбора сведений об отказах. Содержание мероприятий по сбору таких сведений определяется типом изделий и особенностями эксплуатации этих изделий. Возможными источниками статистической информации могут быть сведения, полученные по результатам различных видов испытаний и эксплуатации, которые оформляются периодически в виде отчетов о техническом состоянии и надежности изделий.

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

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

#### **5.5 Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надежности техники при эксплуатации**

Известно, что в процессе эксплуатации изделие определенное время используют по назначению для выполнения соответствующей работы, некоторое время она транспортируется и хранится, а часть времени идет на техническое

обслуживание и ремонт. При этом для сложных технических систем в нормативно-технической документации устанавливают виды технического обслуживания (ТО-1, ТО-2,...) и ремонтов (текущий, средний или капитальный). На стадии эксплуатации изделий проявляются технико-экономические последствия низкой надежности, связанные с простоями техники и затратами на устранение отказов и приобретение запасных частей. С целью поддержания надежности изделий на заданном уровне в процессе эксплуатации необходимо проводить комплекс мероприятий, который может быть представлен в виде двух групп — мероприятия по соблюдению правил и режимов эксплуатации; мероприятия по восстановлению работоспособного состояния.

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

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

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

Необходимо отметить, что с усложнением техники и расширением областей ее использования возрастает роль этапа эксплуатации техники в суммарных затратах на создание и использование технических систем. Затраты на поддержание в работоспособном состоянии за счет технического обслуживания и ремонтов превышают стоимость новых изделий в следующее число раз: тракторов и самолетов в 5-8 раз; металлорежущих станков в 8-15 раз; радиоэлектронной аппаратуры в 7-100 раз.

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

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

## 6. ИСПЫТАНИЯ. ЗАДАЧИ И ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ

Оценка и контроль показателей надежности проводятся по результатам испытаний или наблюдений изделий в процессе эксплуатации.

При испытаниях и наблюдениях за эксплуатируемыми изделиями получают данные о характеристиках, определяющих свойства качества изделий, например, целевые (точность, устойчивость, мощность, быстродействие), конструктивные (прочность, герметичность), эксплуатационные (грузоподъемность, скорость движения) и др.

Данные о соответствии характеристик качества требуемым значениям в заданных условиях эксплуатации и в течение требуемого времени (наработки), полученные в альтернативном виде («соответствует - не соответствует», «успех-отказ») или в виде измеренных значений характеристик, используются для оценки и контроля надежности.

Надежность является комплексным свойством, характеризуемым безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью. Под испытаниями на надежность обычно понимают испытания на безотказность с оценкой и контролем соответствующих показателей безотказности, вычисляемых по статистическим данным о результатах испытаний. Специальные испытания на надежность с оценкой и контролем показателей безотказности для сложных и дорогостоящих изделий в целом, как правило, не проводятся. В этих случаях практикуется совмещение испытаний, при которых определение (контроль) показателей проводится одновременно с экспериментальным исследованием других характеристик изделия.

Специальные испытания по заранее выбранным планам оценки и контроля надежности организуются для комплектующих элементов, несложных узлов и приборов, выпускаемых в массовом производстве.

Оценка и контроль надежности могут проводиться непосредственно по результатам испытаний или наблюдений за функционированием изделия как единого целого. Такой подход, называемый иногда прямым методом оценки надежности, для сложных изделий возможен при натурных испытаниях и при эксплуатации. При ограниченных объемах испытаний изделий или невозможности испытания изделия в целом, например, на ранних стадиях экспериментальной отработки, используют косвенные методы оценки надежности с использованием аналитических или имитационных моделей надежности. В этом случае объединяются результаты испытаний отдельных элементов (узлы, приборы, агрегаты, системы) путем получения оценок надежности элементов непосредственно по результатам их испытаний с последующим расчетом показателей надежности изделия в целом. Иногда такие методы называют расчетно-экспериментальными.

Среди испытаний с оценкой и контролем показателей надежности особо выделяют испытания на долговечность (ресурсные испытания), ремонтпригодность и сохраняемость.

Для сложных изделий к испытаниям на надежность могут быть приравнены испытания на выявление «слабого элемента», утяжеленные (форсированные) испытания, испытания на работоспособность при неблагоприятных сочетаниях внешних и внутренних действующих факторов.

При оценке и контроле надежности важным является понятие «зачетного» и «незачетного» отказа. К незачетным отказам с точки зрения оцениваемых показателей надежности относятся отказы изделий, причины которых однозначно установлены и устранены. Эффективность принятых мер по устранению причин отказа подтверждена необходимыми исследованиями и испытаниями.

Не учитываются также при определении (контроле) надежности отказы, возникшие в результате специальных испытаний с провоцированием отказа, а также отказы, связанные с внешними воздействиями, не предусмотренными технической документацией на изделие, или возникшие вследствие ошибок обслуживающего персонала. К незачетным относятся также отказы, не влияющие на определяемый показатель надежности.

Могут быть проведены следующие виды испытаний: исследовательские (отработочные), контрольные и сравнительные.

К исследовательским испытаниям относятся все отработочные испытания, проводимые в соответствии с конструкторской документацией в процессе экспериментальной отработки опытного изделия. Эти испытания по своим конечным целям подразделяются на автономные и комплексные.

Основными целями автономных испытаний опытных изделий являются:

- отработка конструкторской документации и проверка функционирования отдельных изделий в условиях, близких к реальным;
- отработка технологической документации и контроля качества изготовления изделий;
- определение границ (запасов) работоспособности, оценка соответствия характеристик опытных изделий требованиям ТЗ по результатам испытаний.
- корректировка и присвоение конструкторской документации литеры «О» на изделия, которые подвергаются только комплексным испытаниям. Проводятся по результатам этих испытаний.

Автономным испытанием следует подвергать все вновь создаваемые, модернизируемые, дорабатываемые изделия, а также заимствованные изделия, для которых изменены условия функционирования, предусматривая при этом проведение основного объема экспериментальной отработки. Такой подход позволяет провести всю экспериментальную отработку с минимальными материальными и временными затратами.

Комплексные испытания проводят при экспериментальной отработке взаимного функционирования нескольких опытных изделий на соответствие требованиям ТЗ. Отнесение испытаний к автономным или комплексным конструктор выполняет при формировании комплексной программы экспериментальной отработки опытного изделия. При этом испытания отдельного опытного изделия в целом могут быть отнесены к комплексным испытаниям (по отношению к входящим в него изделиям) или к автономным испытаниям (по отношению к изделию более крупной структуры). Решение по этому вопросу принимают исходя из намеченных целей испытаний.

Основными целями комплексных испытаний опытных изделий являются совместная отработка опытных изделий и проверка (в том числе на предельно допустимых (экспериментальных) режимах) их взаимного функционирования в условиях, близких к реальным, с одновременной имитацией различных

воздействующих факторов; обработка программ и алгоритмов для вычислительных машин; выявление и устранение конструкторских и производственных дефектов на стыках сопрягаемых (смежных) систем, агрегатов, приборов;

- проверка отработанности технологии изготовления, достаточности и эффективности контроля качества изделий, достаточности и правильности выбора испытательного оборудования и контрольно-измерительных средств и дальнейшая обработка технологии серийного изготовления (если изделия в дальнейшем будут изготавливаться серийно);

соответствующая обработка конструкторской и технологической документации;

- проверка работоспособности изделий при имитации аварийных ситуаций, которые технически и безопасно можно осуществить на стендах;

- предварительная оценка соответствия основных характеристик опытных изделий ТЗ (ТУ на опытные изделия), в том числе выполнение требований к надежности в порядке, определенном ТЗ и программой обеспечения надежности, а также оценка обеспечения заданных ресурсов работы изделий;

- проверка полноты и степени обработки комплекта конструкторской и технологической документации.

Все изделия, прошедшие автономные испытания, как правило, подвергают комплексным испытаниям.

К контрольным испытаниям опытных изделий относятся предварительные (приемосдаточные) и приемочные (межведомственные и государственные испытания).

К предварительным испытаниям относятся все контрольные испытания, определенные конструкторской документацией, которым должны подвергаться те изделия, которые подлежат поставке на испытания в изделиях более крупной структуры. Примером таких испытаний являются контрольно-выборочные испытания (КВИ), контрольно-технологические испытания (КТИ), испытания конкретного образца при приемосдаточных испытаниях и на контрольно-испытательных стендах.

На приемочных испытаниях опытных изделий проверяют соответствие характеристик и параметров этих изделий требованиям тактико-технического задания (ТТЗ) заказчика в условиях, максимально приближенных к условиям применения по назначению (эксплуатации), и определения возможности постановки их на серийное (массовое) производство.

К контрольным испытаниям серийных изделий, выпускаемых в массовом производстве, относятся: приемосдаточные испытания, периодические испытания, типовые испытания, инспекционные испытания, аттестационные испытания, испытания установочной партии изделий или головного образца.

Испытания установочной партии изделий или головного образца проводятся с целью подтверждения отработанности серийной технологии и оценки готовности предприятия-изготовителя к серийному (массовому) производству изделий).

Следует отметить, что с целью сокращения сроков освоения серийного или массового производства изделий систему технического контроля качества их изготовления (объекты контроля, перечень контролируемых операций и последовательность их выполнения, техническое оснащение этих операций, режимы,

методы, средства механизации и автоматизации контроля и другие компоненты системы) отрабатываются в процессе опытного производства и проведения экспериментальной отработки этих изделий, а будущим предприятиям-изготовителям серийных изделий поручают изготавливать опытные изделия (один или несколько экземпляров), которые должны пройти приемочные испытания (межведомственные или натурные испытания).

## 7. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ «ЧЕЛОВЕК-МАШИНА»

Надежность систем «Человек - машина» (СЧМ) определяется как свойство системы выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных показателей в заданных пределах при заданных условиях эксплуатации. Надежность СЧМ является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения СЧМ и условий ее эксплуатации может включать безотказность, обслуживаемость, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость в отдельности или определенное сочетание этих свойств, как для системы, так и для ее частей.

В процессе создания и эксплуатации СЧМ должен быть установлен и обеспечен необходимый уровень надежности системы с учетом следующих факторов, в том числе и эргономических:

- СЧМ являются многофункциональными системами, в состав которых входят технические средства, оперативный и обслуживающий персонал;
- СЧМ являются восстанавливаемыми и обслуживаемыми системами, рассчитанными обычно на длительное функционирование;
- СЧМ могут обладать структурным, информационным, временным и функциональным резервированием, поэтому надежность системы в целом может быть выше надежности ее составных частей.

Наличие оперативного и обслуживающего персонала и пользователей в системе может, как увеличивать общую надежность выполнения заданных функций, так и уменьшать ее в зависимости от организации обслуживания и эксплуатации системы.

В процессе функционирования СЧМ происходит приспособление (взаимодействие) человека и машины, позволяющее как повысить, так и понизить надежность СЧМ. Уровень надежности СЧМ в значительной степени определяет эффективность системы.

Требования, предъявляемые к надежности СЧМ, а также методы оценки или контроля надежности СЧМ на различных стадиях создания системы должны быть указаны в ТЗ, техническом и рабочем проектах СЧМ, где должны быть приведены необходимые обоснования и расчеты надежности системы.

Функции СЧМ, для которых устанавливаются показатели надежности, задаются как выполнение некоторых действий (процедур) (функции первого вида) или как достижение некоторого результата, выраженного в удельных (обычно за единицу времени) технических, экономических или социальных показателях (функции второго вида).

Функции СЧМ подразделяют на простые и составные. Простыми являются функции, рассматриваемые как неразложимые на составляющие. Составные функции включают некоторую совокупность простых функций, объединяемых по общности

цели, роли в процессе функционирования, конструктивным, информационным или другим признакам.

Отказом функции, учитываемом при оценке надежности СЧМ, является полная потеря способности системы выполнять эту функцию или нарушение хотя бы одного из требований, предъявляемых к качеству выполнения функции при заданных условиях эксплуатации. Отказом СЧМ в целом (подсистемы СЧМ) является отказ составной функции, реализуемой СЧМ в целом (подсистемой СЧМ).

Требования к безотказности, обслуживаемости и ремонтпригодности устанавливаются для отдельных функций, подсистем и СЧМ в целом. Требования к сохраняемости и долговечности устанавливаются для отдельных подсистем и для СЧМ в целом.

В тех случаях, если нарушение выполнения некоторой функции может явиться следствием нескольких видов отказов, существенно различающихся по причине возникновения или по вызываемым ими последствиям, требования к безотказности, обслуживаемости и ремонтпригодности для каждого вида отказов в отдельности.

Важнейшими показателями надежности СЧМ являются показатели безотказности, обслуживаемости (сюда входят и показатели контролепригодности) и ремонтпригодности, которые следует устанавливать для всех СЧМ. В обоснованных случаях по согласованию между заказчиком и разработчиком допускается устанавливать также показатели сохраняемости и долговечности, уровень квалификации персонала, уровень функционального состояния человека-оператора и другие.

Основными показателями безотказности СЧМ являются: наработка на отказ  $i$ -й функции (в единицах времени), наработка на отказ  $j$ -й подсистемы СЧМ, наработка на отказ СЧМ в целом, вероятность безотказного выполнения  $i$ -й функции в течение заданного времени  $t$ , вероятность безотказной работы  $j$ -й подсистемы СЧМ в течение заданного времени, вероятность безотказной работы СЧМ в целом в течение заданного времени  $t$ .

Основными показателями ремонтпригодности СЧМ являются: среднее время восстановления способности СЧМ к выполнению  $i$ -й функции, среднее время восстановления работоспособности  $j$ -й подсистемы СЧМ, среднее время восстановления работоспособности СЧМ в целом, вероятность восстановления в течение заданного времени способности СЧМ к выполнению  $i$ -й функции, вероятность восстановления в течение заданного времени  $t$  работоспособности  $j$ -й подсистемы СЧМ, вероятность восстановления в течение заданного времени  $t$  работоспособности СЧМ в целом.

Основными показателями обслуживаемости СЧМ являются: среднее время профилактического обслуживания (ПО) СЧМ по  $i$ -й функции, среднее время ПО  $j$ -й подсистемы СЧМ, среднее время ПО СЧМ в целом, вероятность выполнения ПО в течение заданного времени  $t$  по  $i$ -й функции, вероятность выполнения ПО в течение заданного времени  $t$   $j$ -й подсистемы СЧМ, вероятность выполнения ПО в течение заданного времени СЧМ в целом.

В качестве комплексных показателей, характеризующих совместно безотказность, обслуживаемость и ремонтпригодность СЧМ, используют: коэффициенты готовности по  $i$ -й функции,  $j$ -й подсистемы СЧМ в целом,

коэффициенты технического использования по  $i$ -й функции,  $j$ -й подсистемы СЧМ в целом, коэффициенты оперативной готовности по  $i$ -й функции,  $j$ -й подсистемы.

В качестве комплексных показателей надежности СЧМ используют показатели, определяющие снижение эффективности функционирования СЧМ из-за ее недостаточной надежности, например, коэффициент, определяемый как отношение эффективности при данном уровне надежности СЧМ к потенциальному ее значению в предложении абсолютной надежности системы.

Выбор показателей надежности и определение требований, предъявляемых к надежности СЧМ, осуществляют при разработке ТЗ на СЧМ. Эти показатели и требования уточняют в процессе проектирования.

Показатели надежности для конкретной СЧМ выбирают из номенклатуры показателей, приведенных выше, с учетом назначения СЧМ и выполняемых функций, условий работы системы и особенностей ее функционирования, а также специфики и организации работы оперативного и обслуживающего персонала.

В обоснованных случаях в дополнение к основным показателям надежности СЧМ допускается использовать другие показатели надежности в соответствии с действующими нормативными документами.

При определении требований к надежности необходимо учитывать: назначение и функции СЧМ и ее подсистем, условия и режим функционирования СЧМ, временные особенности работы машины и операторов, особенности окружающей среды, возможные последствия отказов функций (подсистем, СЧМ в целом), достигнутый уровень надежности прототипов, возможные пути повышения и обеспечения надежности СЧМ.

В ТЗ на СЧМ следует вносить:

- сведения об условиях и режимах работы СЧМ;
- перечень функций, для которых задаются требования к надежности и признаки отказов по каждой функции;
- требуемые значения показателей надежности;
- необходимую степень учета действий персонала при оценке надежности системы на различных стадиях создания СЧМ;
- методы определения уровня надежности СЧМ на стадиях разработки и способы подтверждения требуемых значений показателей надежности.

В технический и рабочий проект СЧМ необходимо включать:

- перечень функций, для которых задаются показатели надежности и признаки отказов по каждой функции;
- количественные значения показателей надежности;
- условия функционирования, для которых установлены показатели надежности;
- способы подтверждения соответствия показателей надежности требованиям, указанным в техническом и рабочем проектах;
- методы, условия и режим испытаний в случае проведения испытаний СЧМ на надежность;
- правила технической эксплуатации, обеспечивающие требуемый уровень надежности СЧМ в условиях эксплуатации, в том числе содержание и параметры профилактического обслуживания СЧМ, состав комплекта запасных элементов

системы, сроки его пополнения, виды ремонта, численность и квалификацию обслуживающего персонала, режимы труда и отдыха оперативного персонала.

Надежность СЧМ оценивают: при проектировании системы с целью прогноза ожидаемого уровня надежности СЧМ (проектная оценка надежности); при внедрении и эксплуатации системы – с целью определения фактически достигнутого уровня надежности (экспериментальная оценка надежности).

Оценку надежности СЧМ проводят следующими методами: аналитическими, экспериментальными, статистического и имитационного моделирования, комбинированными методами, представляющими собой различные сочетания методов, указанных выше.

Проектную оценку надежности СЧМ можно проводить аналитическими методами, методами статистического и имитационного моделирования или комбинированными методами.

Предварительную оценку надежности СЧМ осуществляют на ранних этапах проектирования системы; эта оценка является ориентировочной для предварительного определения состава комплекса технических средств и структур СЧМ.

Проектную оценку надежности СЧМ с учетом надежности технических средств системы, особенностей алгоритмов и программ, а также действий (процедур) оперативного персонала осуществляют на последующих и завершающих этапах проектирования СЧМ для важнейших функций системы. Эту оценку используют для уточнения состава комплекса технических средств, структур и функций СЧМ, алгоритмов и программ управления, инструкций персоналу системы, а также для определения требований к подготовке и квалификации персонала, режима их труда и отдыха.

Экспериментальную оценку надежности СЧМ можно проводить путем сбора и обработки эксплуатационных данных о надежности СЧМ, а также организации специальных испытаний. При этом с целью уменьшения объема испытаний следует использовать имеющуюся априорную информацию о надежности СЧМ в целом, ее подсистем, отдельных устройств и оперативного персонала.

Методы определения надежности СЧМ выбирают с учетом реальных особенностей системы (возможность проведения испытаний необходимого объема, наличие инженерно- психологических методик, алгоритмов и программ для решения задач оценки надежности и т. п.) и указывают в техническом задании, техническом и рабочем проектах.

При проведении оценки надежности СЧМ аналитическими методами и методами статистического или имитационного моделирования необходимо использовать: инженерно-психологические методики, алгоритмы и программы для ЭВМ, утвержденные и согласованные в установленном порядке; данные о надежности технических средств СЧМ, приведенные в стандартах и документации, утвержденной в установленном порядке, а также соответствующие данные о надежности действий персонала.

При проведении оценки надежности СЧМ экспериментальными методами следует использовать стандарты и методики, утвержденные в установленном порядке.

К методам оценки надежности СЧМ помимо общих требований (возможность изучения инженерной и психофизиологической природы процессов, простота получения исходных и экспериментальных данных и малая трудоемкость) предъявляют ряд специальных:

- учет реальной структуры системы, взаимодействия подсистем и режимов работы;
- совместное влияние различных видов отказов техники и ошибок человека-оператора;
- влияние условий эксплуатации, действий обслуживающего персонала и учет их функционального состояния;
- возможность корректирования и развития методов оценки;
- возможность разработки различных мероприятий по повышению надежности;
- оценка производственных и эксплуатационных расходов с целью возможности их уменьшения.

В зависимости от исходной информации методы расчета надежности СЧМ подразделяют на следующие:

- по статистическим данным об эксплуатации СЧМ;
- по характеристикам надежности входящих в СЧМ;
- по данным об изменении функционального состояния человека-оператора;
- по данным об уровне организации взаимодействия специалистов в системе;
- по данным об этапах существования СЧМ.

В зависимости от степени учета человека все методы оценки надежности СЧМ делят на два класса: учитывающие человека как элемент среды или компонент СЧМ, влияющий на систему; рассматривающие надежность целенаправленной деятельности человека в системе.

К первому классу относят методы оценки надежности технических объектов с учетом деятельности людей (операторов и обслуживающего персонала).

Ко второму классу относят методы, позволяющие априорно или апостериорно оценить надежность деятельности человека в системе: структурный метод; операционно-психофизиологический метод; метод статистического эталона; методы, основанные на моделировании деятельности персонала с использованием аппарата передаточных функций, теории массового обслуживания, ситуационного управления и т.п.

Наиболее разработанным аналитическим методом оценки надежности деятельности человека в СЧМ является обобщенный структурный. Он применим для систем, в которых возможна дифференцированная оценка вероятности безошибочного и своевременного выполнения алгоритма. Ограничениями метода являются недостаточный учет зависимости операций в составе структуры деятельности, возможность накопления ошибок и трудности оценки надежности групповой деятельности.

Даже в полностью автоматизированных системах человек неизбежно выполняет работы по обслуживанию техники. С прогрессом науки и техники предъявляют все более жесткие требования не только к техническим объектам, но и к людям, участвующим в управлении и обслуживании техники. Все время растет значение последствий несвоевременного или неправильного выполнения людьми своих обязанностей. Поэтому целесообразно учитывать не только надежность

техники, но и надежность выполнения работ исполнителями. При этом возможны приводящие к отказам неправильные действия людей, обусловленные недостатком знаний, опыта, небрежностью, а также плохой организацией работы. К отказу объекта могут привести, например, следующие действия: неправильная регулировка, нарушение правил включения и выключения, нарушение порядка, методики и объема профилактических работ и т.д. Надежность работы человека определяется как вероятность того, что работа или поставленная задача будет успешно выполнена персоналом на любой заданной стадии работы системы в течение заданного времени. Следует обратить внимание на сходство данного определения с обычным определением надежности аппаратуры. Однако понятие успешного выполнения работы не совпадает с понятием безошибочной работы. Чтобы предсказать и оценить надежность работы человека, необходимо следующее.

1. При анализе деятельности следует определить наиболее вероятные ошибки человека, которые могут быть совершены при выполнении каждой операции, входящей в технологический процесс. Пусть, например, операция заключается в фокусировке сканирующего устройства. Если возможные ошибки известны. То можно предусмотреть в конструкции аппаратуры или в технологическом процессе средства, обеспечивающие компенсацию этих ошибок (при условии. Что это целесообразно с экономической точки зрения).

2. желательно предсказать наиболее опасные и наиболее частые ошибки, которые могут появиться при эксплуатации и обслуживании данной аппаратуры, подсистемы и системы.

3. желательно также определить частоту отказов СЧМ по вине человека. Это поможет уточнить явления, на которых следует сосредоточить наибольшее внимание.

4. ошибки по-разному влияют на работу СЧМ; многие ошибки могут быть исправлены, если на них сосредоточено внимание оператора или контролирующих его операторов. Поэтому необходимо предсказать не только вероятность того, что ошибки будут сделаны, но также какие ошибки окажут значительное влияние на работу системы, и вероятность того, что работа, несмотря на ошибки, будет выполнена оператором успешно.

Инженер должен стремиться к тому, чтобы при прогнозировании и оценке надежности СЧМ учитывалось влияние работы человека. Любое измерение характеристик работы СЧМ должно включать оценки характеристик человека-оператора. Однако при обычных оценках надежности с помощью среднего времени наработки на отказ часто умышленно исключают отказы по вине человека. Более того, даже если эти оценки включают данные об ошибках по вине человека, все особенности влияния ошибки человека на систему не учитываются. Многие ошибки, совершенные по вине человека, не влияют на функционирование аппаратуры, но влияют на выполнение поставленной задачи.

Все ошибки, совершенные человеком, не являются равноценными, так же как все отказы аппаратуры неодинаковы с точки зрения их влияния на систему. Ошибки могут иметь разные источники. В некоторых случаях ошибки происходят по вине оператора, в других они являются следствием некачественной разработки системы и плохих условий эксплуатации.

При накоплении в системе ошибок от двух источников общую ошибку СЧМ можно значительно снизить путем уменьшения большей ошибки, так как сокращение

меньшей ошибки оказывает незначительное влияние на общую ошибку системы. В оперативной ситуации существует тенденция увеличения ошибки, источником которой является человек. Поэтому значительного увеличения надежности можно добиться введением в систему конструктивных изменений именно этого вида ошибок.

Ошибки системы обуславливаются следующими причинами: элементы системы (персонал, аппаратура, методы, технические данные, материально-техническое обеспечение и связь) непригодны или не обладают требуемыми характеристиками; методы организации некачественны.

Ошибки в системе возможны, например, если оператор выполняет задачу неправильно в связи с неправильными методическими указаниями. Дефект в этом случае относится к системе. Дефект в этом случае относится к системе. Среди ошибок оператора необходимо также различать ошибки, влияющие на функционирование СЧМ, и ошибки, не оказывающие такого влияния. Ошибки по вине человека, влекущие за собой отказы. Являются необратимыми, так как аппаратура, оказавшаяся неисправной или имеющая характеристики, несоответствующие допускам, как правило, не может самовосстановиться. Ошибки же, не приводящие к отказу аппаратуры, часто могут быть исправлены.

Поэтому нельзя однозначно отождествлять ошибку человека с надежностью работы человека, так как необходимо знать степень влияния этой ошибки, прежде чем определить связь ее с надежностью системы. Аналогичная проблема возникает при определении того, насколько «благоприятны» для совершения ошибок условия выполнения данной задачи.

## **8. ЗАЩИТА ИЗДЕЛИЙ ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Осуществление мероприятий по защите изделий от воздействия климатических факторов начинается с разработки изделия. В процессе конструирования непрерывно идет выбор того или иного решения: либо применять высококачественные элементы: либо применять высококачественные элементы, либо достигать того же результата благодаря применению средств защиты. Выбор того или иного варианта определяется габаритно-весовыми характеристиками разрабатываемого изделия, требованиями по надежности, стоимостными показателями и др.

В результате глубокой проработки возможных вариантов конструкции изделий, их узлов и деталей достигается значительное ослабление воздействия внешних факторов. Высокая эффективность защиты достигается только в результате осуществления комплекса мероприятий. Выбор материалов и элементов – важная, но не единственная составляющая этого комплекса.

Необходима глубокая проработка вопросов совместимости материалов. Например, проблему контактирующих пар следует учитывать не только для металлов, но и для соприкосновения металлов с другими материалами, в особенности с пластмассами.

При выборе вида защиты выделяют материалы, обладающие высокой гигроскопичностью или склонные к концентрации влаги. Их поверхность должна быть по возможности герметичной. Этим требованиям более полно удовлетворяют термопластичные материалы. Многие пресованные детали из терморезистивных

пластмасс оказываются непригодными вследствие повреждений пленки, образующейся при прессовании.

Большинство неисправностей и отказов технических изделий при эксплуатации возникает в контактах металлов и металлов с пластмассами. Не все металлы и их сплавы могут надежно контактировать в сложных условиях эксплуатации.

В ГОСТ 9.005-72 указаны допустимые и недопустимые контакты различных материалов и их сплавов. Допустимость контактов установлена с учетом разности потенциалов металлов, их поляризуемости в данной среде, омического сопротивления среды и соотношения площадей металлов, находящихся в контакте.

**Защита от контактной коррозии** должна осуществляться: электрической изоляцией (электрическим разъединением) контактирующих металлов; электрохимическими методами (катодная и протекторная защита, анодные покрытия); исключением или уменьшением агрессивного воздействия коррозионной среды (введение ингибиторов, обессоливание, обескислороживание).

Для изделий, предназначенных для эксплуатации в морской и пресной воде, следует применять комплексные методы защиты: электрохимическая защита, окраска и уплотнение зазоров; электроразъединение; применение допустимых и ограниченно допустимых контактов металлов. При конструировании изделий контакты следует располагать в местах, где условия эксплуатации менее агрессивны: отсутствуют воздействия электролита и периодическое смачивание, воздействие брызг воды.

В сварных и паяных конструкциях разность потенциалов между сварным швом и основным металлом не должна превышать 30-50 мВ. Необходимо исключать возможность скапливания воды в местах контакта разнородных металлов.

Способы электрического разъединения, толщина и форма прокладок и других разъединительных деталей устанавливаются в специальных стандартах. Применяемые лакокрасочные покрытия в качестве изоляционного материала для изделий, эксплуатируемых в атмосферных условиях, следует наносить на оба контактируемых металла (допускается наносить только на катодный металл).

**Электрохимическая защита** от контактной коррозии применяется в случаях, когда можно осуществить электрическое разъединение контактируемых металлов. Для изделий, эксплуатируемых в морской или пресной воде, электрохимическая защита контактов металлов осуществляется с помощью протекторов (магниевые сплавы, цинк, сплавы алюминия с цинком, сталь), которые присоединяются к контактной паре. Марка металла-протектора, его конструкция и форма определяются местом установки протектора и сроком службы изделия. При эксплуатации в средних, жестких и очень жестких условиях защиту контактов осуществляют посредством их изоляции от воздействия внешней среды (применение лакокрасочных покрытий, клеев, герметиков, шпатлевок). Применяют специальную обработку коррозионной среды посредством снижения концентрации соли и кислорода, введением ингибиторов коррозии.

Степень защищенности изделия от воздействия внешних факторов существенно зависит от выбора формы детали. Например, следует избегать острых краев у металлических деталей, так как коррозия прежде всего начинается на краях. Применяя склеивание металлических деталей, следует иметь в виду, что соединения высококачественными клеями не всегда стойки к воздействиям влажной и теплой окружающей среды.

При монтаже изделий следует учитывать климатические условия на рабочем месте. Работы должны проводиться при более низкой температуре, чем точка росы, а детали, подлежащие герметизации, должны быть высушены. Если этого не сделано, то при колебаниях температуры образуется конденсат внутри герметизированного блока, что может стать причиной серьезных повреждений. При конструировании необходимо придавать большое значение теплоотдаче, используя все возможности, а именно лучеиспускание, теплопроводность, конвекцию. Например, лучеиспускание можно существенно регулировать посредством окраски. Конструкция изделия должна быть выполнена так, чтобы возникающие в результате нагрева воздушные потоки не встречали препятствий.

**Защита изделий от воздействия влажностно-теплового комплекса.** Все изделия подвержены воздействию климатических факторов. Последствия воздействия зависят от их уровня, продолжительности, качества материалов, из которых изготовлены изделия, и примененных мер защиты от внешних факторов. Методы защиты изделий весьма разнообразны. Однако абсолютная защита изделий от внешних факторов практически недостижима. В качестве наиболее близкого достижения абсолютной защиты рассматривают применение герметичных кожухов.

**Защита металлических изделий.** Применяемые методы защиты этих изделий должны обеспечить исключение коррозии металлов. Одним из простейших методов защиты металлов является полирование их поверхностей. Для получения качественной поверхности с помощью полирования и шлифования необходимо учитывать свойства материалов металлов.

В промышленном производстве получили широкое применение искусственные шлифовальные средства. Применяют в основном следующие материалы: для стали – электрокорунд (60-95 % окиси алюминия и окиси железа, кремния и титана), для чугуна – карбид кремния, для твердых металлов – карбид бора, для очень тонкого шлифования твердых металлов – алмаз.

Для защиты металлов от коррозии необходимо блокировать химическую реакцию между металлом и окружающей средой. Способность металла переходить в данной среде в раствор характеризуется электрохимическим потенциалом металла. Если в данной среде электрохимический потенциал металла детали выше, чем у покрытия, то покрытие защищает деталь даже при нарушении целостности слоя, потому что покрытие является растворимым электродом и скорее подвергается разрушению, чем металл детали. Если в данной среде электрохимический потенциал покрытия больше, чем электрохимический потенциал металла детали, то покрытие защищает деталь только механически до момента его оголения.

Защитные свойства и продолжительность срока службы анодных покрытий зависят в основном от их толщины, а катодных – от толщины и пористости. Для беспористого покрытия толщина медного подслоя должна быть не менее 20 мкм; для покрытия никелем – 15 мкм; хромом – 0,5 мкм.

Для реализации рекомендаций по защите изделий и деталей необходимо учитывать следующие положения.

При защите магнитопроводов встречаются следующие трудности: покрытие сердечника влияет на магнитные характеристики.

Крепежные изделия (диаметр более 6 мм) для средних условий эксплуатации можно защищать беспористым хромовым покрытием с толщиной слоя 12-10 мкм,

никелем с подслоем меди (меди 6 мкм, никеля 6 мкм) или кадмия с последующим хромированием.

Не рекомендуется наносить гальванические покрытия на пружины, так как это делает их ломкими.

Для защиты от коррозии деталей из меди и медных сплавов, особенно при содержании меди менее 62%, рекомендуется применять никелирование и хромирование.

Для стальных деталей можно применять трехслойное покрытие: медь-никель-хром.

**Лакокрасочные покрытия.** Лакокрасочное покрытие придает изделию красивый вид и одновременно служит для защиты от влаги. Лакокрасочные покрытия применяют тогда, когда на детали нет точных допусков и когда они не подвержены трению.

Для окраски применяют лаки, краски и эмали, получаемые на основе растительных и синтетических пленкообразных веществ. Для улучшения качества покрытия осуществляют пигментирование лаков (введение в лаки пигментов, например, двуокиси титана рубиновой модификации).

Для обеспечения требуемой защиты изделий с помощью лакокрасочных покрытий необходимо по специальной технологии подготовить поверхность защищаемой детали, выбрать шпатлевку, грунт и режим сушки покрытия.

В качестве защиты изделий при работе в жестких климатических условиях наносят покрытие из двух, трех или четырех слоев эмали (лака).

Защиту поверхности от влаги осуществляют обычно с помощью глянцевых эмалей.

Рассматривая вопросы защиты изделий с помощью лакокрасочных покрытий, необходимо учитывать следующие положения:

Эффективность защиты в значительной степени повышается, если при заданной толщине покрытия наносить несколько слоев тонких пленок вместо одной толстой; эпоксидные и кремнийорганические лаки и эмали обладают высокими электроизоляционными свойствами.

Защита изделий от воздействия плесневых грибов. Основным методом защиты можно считать химический метод – применение специальных ядов в качестве фунгисидов, т.е. веществ, омертвляющих плесень, и фунгистических веществ, приостанавливающих плесень.

Универсальных фунгисидов и фунгистических веществ не существует, каждое их отравляющих веществ действует на определенные разновидности плесени.

По составу различают органические фунгисиды, неорганические и металлоорганические.

Органические фунгисиды – составы на основе хлора, фенола, нитрофенола. Неорганические фунгисиды – соли меди, ртути, цинка и хрома. Металлоорганические фунгисиды – соединения с медью, цинком, ртутью применяют для предотвращения гниения.

Для защиты деревянных изделий применяют лакоантисептические покрытия с препаратами трихлорфенолата меди, хлордана. При контакте дерева с землей применяют автоклавную пропитку в препаратах таналита, хемонита.

Составы, содержащие медь, нельзя применять для пропитки деревянных изделий и аппаратуры, имеющей резиновые элементы (медь окисляет резину).

## 9. ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ ГОРНЫХ МАШИН

Усталость материала детали приводит к внезапному разрушению после развития усталостной трещины до величины, когда статическая прочность остаточного сечения оказывается недостаточной для противостояния нагрузкам. На практике число усталостных разрушений велико: зубья шестерен, валы и оси, подшипники, железнодорожные колеса и рельсы, пружины, болты и другие детали.

Пластические деформации встречаются в деталях из вязких материалов. Примерами пластических деформаций могут служить искривления валов и осей, вытяжка болтов при монтаже или эксплуатации, осадки пружин, выдавливание канавок на дорожках подшипников качения, смятие шпонок, шпоночных канавок, шлицев и др.

Механический износ – довольно частая причина отказов горных машин. Механический износ вызывает:

- понижение прочности вследствие уменьшения сечения (зубья шестерен и колес, тяговые цепи выемочных и доставочных машин и пр.), а также одновременно с этим увеличение динамических нагрузок;

- полное исчерпание работоспособности в результате полного истирания (рабочий инструмент, зубья ковшей и элементы исполнительных органов выемочных машин, решетки скребковых конвейеров);

- понижение коэффициента полезного действия и увеличение утечек рабочей жидкости и смазки (насосы, гидродвигатели, гидроаппаратура, узлы цилиндр – поршень и пр.).

Механический износ – это результат процесса постепенного разрушения поверхностных слоев деталей при трении, заключающегося в изменении их размеров, формы и состояния поверхности. При износе в сопряжении происходят сложные процессы, обусловленные микрорезанием, пластическим деформированием, усталостными явлениями, окислительными и адгезионными процессами, температурными воздействиями и др.

В зоне контакта сопрягаемых поверхностей могут протекать физические, механические и химические процессы, однако ведущим обычно бывает какой-либо один из факторов, который и определяет ход процесса изнашивания.

Для горных машин наиболее характерно абразивное изнашивание. При этом на трущихся поверхностях появляются абразивные частицы, разрушающие поверхности путем микрорезания. Эти частицы либо попадают в смазку извне, либо являются продуктом разрушения (стружки), либо являются твердыми структурными составляющими материала поверхностей данной пары трения. Поэтому во многих случаях эти абразивные частицы не могут быть полностью удалены даже при хорошей фильтрации смазочных масел.

Старение наблюдается обычно у неметаллических изделий и заключается в изменении их физико-механических свойств под воздействием погодноклиматических условий (пластмассовые, резинотехнические изделия).

Наибольшую долю простоев очистных комплексов, работающих на шахтах Донецкого угольного бассейна, из-за отказов имеют узкозахватные комбайны (4,1-6,3 %). Простой из-за отказов забойных скребковых конвейеров составляют 3,7-5,3 %, из-за отказов механизированных крепей – 1,6-2,4 % от времени работы забоя.

Среди систем и узлов комбайнов наименее надежными с точки зрения безотказности являются системы энергоснабжения (16,2-26,4 %), пылеподавления (16,4-24,1 %) и система связи комбайна с конвейером (13,5-20,0 % отказов комбайна). Наиболее часто (до 80 %) системы пылеподавления и связи комбайна с конвейером отказывают из-за засорения форсунок орошения, схода комбайна с конвейера. На режущую часть, механизм подачи и электрооборудование в совокупности приходится только 8,9-24,9 % всех отказов комбайна.

В скребковых конвейерах наименее надежными по безотказности элементами являются скребковая цепь с коэффициентом отказов  $K_o=0,4-0,5$  (в струговых установках – до 0,6), затем электрооборудование –  $K_o=0,1-0,22$ , приводные головки – 0,05-0,1.

Наибольшее количество отказов элементов механизированной крепи имеет металлоконструкция (27,6-51,6 %) и гидроразводка секции (15,7-25,4 %), а также магистральные трубопроводы (3,4-18,4 %) и насосная станция (8,7-13,9 %).

В табл. 9.1 показан ресурс и срок службы до 1-го капитального ремонта и ресурс между капитальными ремонтами узкозахватных комбайнов очистных комплексов. В табл. 9.2 показан ресурс и срок службы до 1-го капитального ремонта и ресурс между капитальными ремонтами скребковых конвейеров.

Таблица 9.1 – Показатели долговечности очистных комбайнов

Оборудование	Ресурс и срок службы, тыс. т, (мес.)	
	до 1-го капремонта	между капремонтами
1К101	210 (12)	168 (10)
2К52М	270 (12)	216 (10)
1ГШ68	360 (12)	288 (10)
КШ1Г	215 (12)	172 (10)
КШЗМ	450 (12)	360 (10)

Таблица 9.1 – Показатели долговечности скребковых конвейеров

Оборудование	Ресурс и срок службы, тыс. т, (мес.)	
	до 1-го капремонта	между капремонтами
СП63М	300 (12)	240 (10)
СП130	420 (12)	336 (10)
СП87П	420 (12)	338 (10)
КМ81-02БМ	480 (12)	384 (10)
СУ-ОКП70	500 (12)	400 (10)

Причины недостаточной надежности забойного оборудования кроются в использовании узлов оборотного фонда с некоторым начальным износом, в недостаточной оснащённости ремонтным оборудованием и в нехватке квалифицированного персонала. В условиях мелкосерийного, отчасти единичного ремонтного производства, входящего в структуру горного предприятия, очень сложно обеспечить специализацию ремонта.

## 10. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Повысить уровень надежности систем возможно двумя путями: повышением надежности ее элементов и структурированием, т. е. изменением структуры системы путем резервирования отдельных элементов и целых блоков. При эксплуатации

первый путь повышения надежности оказывается целесообразным только в случае модернизации (совершенствования) конструкции машин, что в условиях горного производства не всегда бывает экономически выгодным. Более приемлемо резервирование элементов системы механизации горных работ. Однако в этом случае увеличивается парк технологического оборудования. Для обоснования численности парка машин необходимо установить экономически целесообразные пределы уровня надежности процессов добычи полезного ископаемого, которые поддерживаются как системой технического обслуживания, так и резервированием элементов системы механизации горных работ.

В теории и практике горного машиностроения применяются следующие методы повышения надежности элементов машин:

- использование современных информационных технологий, обеспечивающих ускоренный и достоверный анализ вариантов конструкции;
- применение более износостойких материалов для изготовления;
- применение технологий, повышающих ресурс и(или) удешевляющих изготовление и эксплуатацию;
- разработка конструкций с высокой ремонтпригодностью, требующей одновременно минимума приспособлений и оснастки для замены;
- модернизация работающих конструкций, обеспечивающая перечисленные выше требования.

При проектировании и изготовлении горных машин применяют нагрузочное, а в эксплуатации – временное и структурное резервирование.

Нагрузочное резервирование осуществляется повышенной мощностью приводов, увеличенным запасом прочности и износостойкости деталей, высоким классом изоляции электрических машин и аппаратов, рассчитанных на работу машин в тяжелых условиях горнодобывающего предприятия.

Временное резервирование осуществляется установкой в транспортных системах горных предприятий промежуточных складов или бункеров-накопителей полезного ископаемого, что позволяет допускать простои системы добычи полезного ископаемого определенной длительности из-за отказов либо самой транспортной системы, либо выемочно-погрузочного оборудования. Временное резервирование применяется практически на любом горном производстве, где это экономически оправдано. Особенно необходимо временное резервирование при подаче руды на обогатительную фабрику или на погрузочный пункт для отправки потребителям. При этом объем склада руды или полезного ископаемого должен быть экономически обоснован, поскольку при складировании продукта увеличиваются активы предприятия и снижается их оборачиваемость.

Структурное резервирование осуществляется введением в структуру системы дополнительных (резервных) элементов или групп элементов. Резервные элементы могут находиться в нагруженном и ненагруженном режимах использования по назначению. Нагруженным называется резерв, при котором резервные элементы используются в режиме работы основного элемента или группы элементов, и ненагруженным, если резервные элементы не выполняют функции основного элемента до момента возникновения его отказа (ВМП, ВГП).

Ненагруженный режим использования резервных элементов может быть горячим или холодным. При горячем ненагруженном режиме резервные элементы

готовы в любой момент выполнять функции основного элемента, а при холодном – требуется некоторое время на подготовку резервных элементов перед выполнением функций основного элемента. При холодном резерве имеют место дополнительные затраты времени на замещение отказавших элементов (например, разогрев), что снижает безотказность систем.

Динамическое резервирование связано с изменением структуры системы. При этом в случае отказа любого основного элемента или любой группы основных элементов происходит передача их функций элементу или группе элементов из общего резерва. В этом случае происходит перестройка (изменение) структуры системы, т. е. структура системы постоянно меняется. Для обслуживания системы с динамическим резервом необходимы либо оператор, либо автоматические переключающие устройства и механизмы.

Наибольшее повышение надежности системы обеспечивает динамическое резервирование ненагруженными элементами. Однако в этом случае из-за необходимости иметь переключающие устройства, такие системы имеют более высокую стоимость.