

Некоммерческое акционерное общество  
Рудненский индустриальный институт

ЛЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС  
по дисциплине «Надежность технологических машин»  
для студентов образовательной программы бакалавриата  
«Эксплуатация и ремонт технологических машин и оборудования»

Составила Алтынбаева Г.К., к.т.н.  
ст.преподаватель

Рудный 2022

ББК 34.41

Автор: Алтынбаева Г.К. Конспект лекций по дисциплине «Надежность технологических машин». – Рудный, РИИ, – 2022. – 23 с.

В конспекте лекций рассмотрены основные положения надежности элементов (деталей, узлов, электрооборудования) горных машин и комплексов с учетом существующих теоретических законов распределения отказов, их причин в различных условиях эксплуатации.

Конспект лекций предназначен для студентов образовательной программы бакалавриата «Эксплуатация и ремонт технологических машин и оборудования».

Список рек. лит. – 8 назв.

Для внутривузовского использования

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Тема 1 Введение	5
Тема 2 Основные понятия и определения	6
Тема 3 Понятия отказа и неисправности. Классификация отказов	8
Тема 4 Случайные события и их вероятности	9
Тема 5 Случайные величины и распределения вероятности	10
Тема 6 Числовые характеристики распределения вероятностей	11
Тема 7 Системы и элементы расчета. Невосстанавливаемые и восстанавливаемые объекты	12
Тема 8 Количественные характеристики надежности невосстанавливаемых изделий	13
Тема 9 Количественные характеристики надежности восстанавливаемых изделий	15
Тема 10 Характеристики ремонтпригодности	15
Тема 11 Характеристики долговечности	16
Тема 12 Расчет надежности отдельных групп деталей машин	17
Тема 13 Испытания на надежность	19
Тема 14 Расчет надежности горного оборудования	20
Тема 15 Влияние эксплуатационных свойств на надежность и пути повышения	22
Список рекомендуемой литературы	23

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность горных машин и оборудования обеспечивается на трех этапах их «существования»: при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

На этапе проектирования закладывается требуемый уровень надежности в зависимости от причин отказов, структуры системы и данных испытаний.

В процессе производства поддерживается уровень заданной надежности за счет конструктивных и технологических корректировок (дополнений, изменений) системы с целью устранения причин отказов. Важная роль при этом отводится испытаниям на надежность.

Эксплуатация горных машин и оборудования предусматривает рациональные приемы технического обслуживания и ремонта, позволяющие поддерживать уровень надежности, заложенный при проектировании и производстве.

Цель лекционного курса состоит в изучении теоретических положений дисциплины, а также расчетов по основным разделам курса.

## ТЕМА 1. ВВЕДЕНИЕ

### План лекции:

1) Задачи изучения дисциплины: изучение теоретических основ надежности; изучение математического аппарата теории надежности; освоение методов расчета параметров надежности технологических машин и их элементов; изучение методов расчета эксплуатационных показателей технологических машин и оборудования в зависимости от уровня их надежности.

2) Значение курса в системе подготовки бакалавров технологических машин и оборудования и его связь со смежными дисциплинами. Краткая характеристика курса и методология его изучения. Термины и понятия. Перспективы развития.

### 1. Задачи изучения дисциплины

#### Задачи изучения дисциплины:

- изучение теоретических основ надежности;
- изучение математического аппарата теории надежности;
- освоение методов расчета параметров надежности технологических машин и их элементов;
- изучение методов расчета эксплуатационных показателей технологических машин и оборудования в зависимости от уровня их надежности.

2. Значение курса в системе подготовки бакалавров технологических машин и оборудования и его связь со смежными дисциплинами. Краткая характеристика курса и методология его изучения. Термины и понятия. Перспективы развития.

В настоящее время быстрыми темпами развивается техника и технология, применяемая в горной промышленности, создаются новые высокопроизводительные и дорогостоящие машины. Растут требования к качеству горных машин (ГМ). Важнейшим показателем качества является надежность машин, от которой в значительной степени зависит эффективность использования ГМ.

ГМ работают в определенной среде, обслуживаются и управляются человеком, поэтому целесообразна системная оценка надежности ГМ. При формальной оценке надежности ГМ рассматривается как система, переходящая из одного состояния в другое, что позволяет применить теорию массового обслуживания к определению различных характеристик надежности. При прогнозировании надежности на стадии проектирования рассматривается система человек – машина – окружающая среда.

Факторы, влияющие на надежность ГМ, носят случайный характер. Очень часто случайны масса поднимаемого груза, ветровые и динамические нагрузки. Также случайна несущая способность деталей ГМ.

Важными вопросами в теории надежности ГМ являются определение показателей надежности машин в эксплуатационных условиях, расчет показателей надежности элементов и систем при проектировании, разработка мероприятий по повышению надежности этих машин.

## ТЕМА 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

План лекции:

- 1) Основные понятия и определения теории надежности как науки.
- 2) Качественные критерии надежности.

### 1. Основные понятия и определения теории надежности как науки

Объект – предмет познания и практической деятельности человека. В теории надежности рассматриваются объекты определенного целевого назначения, являющиеся результатом производственной деятельности человека: изделие, система, элемент.

Изделие является видом продукции. Изделие при использовании расходует свой ресурс в отличие от продукта, который расходуется сам. Изделие в теории надежности рассматривается в периоды проектирования, изготовления, эксплуатации, исследования и испытания на надежность. Изделие может рассматриваться или как система, или как элемент.

В теории надежности важным является понятие дефекта изделия, представляющее собой частный случай понятия дефекта продукции. По возможности устранения дефектов изделия делятся на две группы: невосстанавливаемые и восстанавливаемые.

Дефект продукции – каждое отдельное несоответствие требованиям нормативно-технической документации.

Техническое состояние изделия характеризуется совокупностью параметров или качественных признаков.

В дальнейшем изложении будет использоваться термин «объект» вместо термина «изделие» в соответствии с ГОСТ 27.002-83.

Классификация объектов на невосстанавливаемые и восстанавливаемые необходима в связи с различиями в показателях надежности и методах их определения.

Невосстанавливаемым называется объект, работоспособность которого после отказа не подлежит восстановлению и рассматриваемой ситуации. Восстанавливаемым называется объект, работоспособность которого после отказа подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации.

Отнесение объекта к одной из этих групп определяется или видом функционального дефекта объекта, или целесообразностью восстановления работоспособного состояния объекта, или назначением объекта, или этапом эксплуатации объекта, или особенностями эксплуатации объекта.

Некоторые объекты не подлежат восстановлению из-за экономической нецелесообразности, хотя являются принципиально восстанавливаемыми. В то же время для многих объектов оказывается экономически целесообразным даже частичное восстановление ресурса, например, при восстановлении автопокрышек.

Отнесение объектов к восстанавливаемым или невосстанавливаемым может определять этап эксплуатации. Например, метеоспутник является вос-

становливаемым объектом на этапе хранения и невозстановливаемым объектом во время полета.

Элемент – простейшая в рамках конкретного рассмотрения составная часть системы.

Техническая система является множеством элементов, взаимосвязанных функционально и взаимодействующих друг с другом в процессе выполнения определенного круга задач. Понятие система имеет чрезвычайно широкую область применения. Практически каждый объект может быть рассмотрен как система.

В теории надежности рассматривается работоспособное, исправное, неисправное и предельное состояние объекта.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях.

Надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость в отдельности или сочетание этих свойств как объекта в целом, так и его частей. Для конкретных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение заданного времени или заданной наработки.

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

Ремонтпригодность свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособности проведением технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования.

## 2. Качественные критерии надежности

Для решения практических вопросов в области надежности необходимы критерии, с помощью которых можно количественно характеризовать уровень надежности горных машин и комплексов и их элементов.

Критерии надежности должны удовлетворять следующим требованиям и позволять:

- учитывать различные факторы, влияющие на надежность горных машин и комплексов;
- быть наглядными и иметь ясный физический смысл;
- иметь достаточно простое и удобное для вычислений математическое выражение;

- рассчитывать надежность при проектировании горных машин и комплексов и определять ее экспериментально при испытаниях и в процессе промышленной эксплуатации;
- оценивать влияние уровня надежности горных машин и комплексов на их производительность;
- намечать пути повышения надежности применяемого и вновь создаваемого оборудования;
- определять необходимое количество запасных частей;
- оценивать надежность выполнения горной машиной или комплексом их основных функций.

При наличии количественных значений критериев (показателей надежности), полученных в результате испытаний и эксплуатации ранее созданных машин, может быть определена теоретическая (предполагаемая) надежность проектируемой машины.

Критерии, количественные значения которых определяются в процессе лабораторных и стендовых заводских испытаний при работе машин в соответствии с режимами, указанными в технических условиях, характеризуют техническую надежность машин и их элементов.

Надежность горных машин и комплексов, определенная в условиях промышленной эксплуатации с учетом комплексного воздействия различных факторов, связанных с условиями эксплуатации и обслуживания, называется эксплуатационной надежностью.

### ТЕМА 3. ПОНЯТИЯ ОТКАЗА И НЕИСПРАВНОСТИ. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ

План лекции:

- 1) Понятия отказа и неисправности.
- 2) Классификация отказов: внезапные (мгновенные) и постепенные (износные). Опасные, срочные, несрочные, совместимые, полные, полномочные, ошибочные, перемеживающиеся, второстепенные.

#### 1. Понятия отказа и неисправности

В теории надежности рассматриваются следующие массовые однородные случайные события: повреждение, отказ, восстановление, ремонт.

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

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

В неработоспособном состоянии функциональные параметры объекта и, следовательно, его эксплуатационные показатели выходят за допустимые пределы, и объект не способен выполнять хотя бы одну из заданных функций. Например, при поломке двигателя полностью утрачивается его работоспособность, и он переходит в неработоспособное состояние - это отказ. При



засорении системы подачи топлива мощность двигателя снижается ниже установленного уровня, его работоспособность нарушается и он переходит в неработоспособное состояние – в тот же отказ.

Отказ является частным случаем повреждения. Возникновение отказа обязательно связано с появлением функционального дефекта. Однако не всякий дефект означает возникновение отказа. Существует много таких нефункциональных дефектов, при которых объект может продолжать выполнение своих функций. Эти дефекты не требуют принятия немедленных мер и могут быть устранены при наступлении первого перерыва в работе или при очередном ремонте. Например, к ним относятся дефекты контрольных измерительных приборов, не участвующих непосредственно в работе объекта, перегорание осветительных лампочек приборного щитка, дефекты защитных кожухов, дефекты защитных покрытий и т.д.

2. Классификация отказов: внезапные (мгновенные) и постепенные (износные). Опасные, срочные, несрочные, совместимые, полные, полномочные, ошибочные, перемеживающиеся, второстепенные.

Отказы горных машин и комплексов можно классифицировать по ряду признаков.

Под опасными понимаются отказы, создающие опасную ситуацию в момент возникновения или при их устранении.

Срочным называется отказ, который должен устраняться сразу после его возникновения. Несрочными являются отказы, устранение которых может быть отложено на некоторое время.

Совместимый отказ может устраняться одновременно с работой выемочной горной машины.

Явные отказы, в отличие от неявных, обнаруживаются при внешнем осмотре или включении машины. Определение их места нахождения может быть произведено за короткий промежуток времени.

Полные отказы приводят к нарушению всех функций, которые должна выполнять машина. Частичный отказ вызывает ухудшение качества выполняемых функций.

## ТЕМА 4. СЛУЧАЙНЫЕ СОБЫТИЯ И ИХ ВЕРОЯТНОСТИ

План лекции:

1) Случайные события. Относительная величина случайного события. Классическое определение вероятности. Основные свойства вероятности.

2) Правило сложения вероятностей. Совмещение случайных событий. Независимые случайные события. Условные вероятности. Общее правило умножения вероятностей. Формула полной вероятности.

1. Случайные события. Относительная величина случайного события. Классическое определение вероятности. Основные свойства вероятности.

Теория вероятностей - математическая наука, изучающая закономерности в случайных явлениях.

Одним из основных понятий является - случайное событие.

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Правило сложения вероятностей. Совмещение случайных событий. Независимые случайные события. Условные вероятности. Общее правило умножения вероятностей. Формула полной вероятности.

Теорема сложения вероятностей.

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

Теорема умножения вероятностей.

Вероятность произведения двух событий  $A_1$  и  $A_2$  равна вероятности одного из них, умноженной на условную вероятность другого, в предположении, что первое событие произошло:

Формула полной вероятности.

Если по результатам опыта можно сделать  $n$  исключаящих друг друга предположений (гипотез)  $H_1, H_2, \dots, H_n$ , представляющих полную группу несовместных событий (для которой  $\sum_{i=1}^n P(i)=1$ ), то вероятность события  $A$ , которое может появиться только с одной из этих гипотез, определяется

## ТЕМА 5. СЛУЧАЙНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ

План лекции:

1) Случайные величины и распределение вероятностей. Дискретные и непрерывные случайные величины.

2) Функции от случайных величин. Законы распределения. Интегральная и дифференциальная функции распределения.

1. Случайные величины и распределение вероятностей. Дискретные и непрерывные случайные величины.

Случайная величина – величина, которая в результате опыта может принять то или иное неизвестное заранее значение.

Случайные величины могут быть дискретными (количество отказов возникающих за определенное время), непрерывные (значение величины непрерывно заполняет некоторый промежуток времени).

2. Функции от случайных величин. Законы распределения. Интегральная и дифференциальная функции распределения.

Соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими вероятностями называют Законами распространения случайной величины.

Наиболее простой формой закона распространения случайной величины является ряд распределений, который может быть представлен в виде графиков.

## ТЕМА 6. ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

План лекции:

1) Математическое ожидание, мода, медиана, начальный и центральные моменты.

2) Дисперсия и среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариаций случайной величины.

1. Математическое ожидание, мода, медиана, начальный и центральные моменты

Математическое ожидание – сумма произведений всех возможных значений на вероятность этих значений.

Для дискретных случайных величин:

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

Для непрерывных случайных величин:

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

Мода – значение случайной величины, при которой плотность максимальна

Медиана ( $Me$ ) – значение случайной величины, для которой одинаково вероятно, окажется ли эта величина меньше или больше  $Me$ .

2. Дисперсия и среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариаций случайной величины.

Дисперсия – это момент ожидания квадрата отклонения случайной величины.

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

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

Наряду с дисперсией пользуются средним квадратичным отклонением:

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

## ТЕМА 7. СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА. НЕВОСТАНАВЛИВАЕМЫЕ И ВОССТАНАВЛИВАЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

План лекции:

1. Основные понятия и термины надежности техники.
2. Системы и элементы расчета. Понятие не восстанавливаемости и восстанавливаемости изделий систем.

1. Основные понятия и термины надежности техники.

Структура системы – логическая схема взаимодействия элементов, определяющая работоспособность системы или иначе графическое отображение элементов системы, позволяющее однозначно определить состояние системы (работоспособное/неработоспособное) по состоянию (работоспособное/неработоспособное) элементов.

По структуре системы могут быть:

- система без резервирования (основная система);
- системы с резервированием.

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

По виду резервирования подразделяют на:

- пассивное (нагруженное) – резервные элементы функционируют наравне с основными (постоянно включены в работу);

активное (ненагруженное) – резервные элементы вводятся в работу только после отказа основных элементов (резервирование замещением).

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

2. Системы и элементы расчета. Понятие невосстанавливаемости и восстанавливаемости изделий систем.

Задача расчета надежности: определение показателей безотказности системы, состоящей из невосстанавливаемых элементов, по данным о надежности элементов и связях между ними.

Цель расчета надежности:

обосновать выбор того или иного конструктивного решения;  
выяснить возможность и целесообразность резервирования;  
выяснить, достижима ли требуемая надежность при существующей технологии разработки и производства.

Расчет надежности состоит из следующих этапов:

1. Определение состава рассчитываемых показателей надежности.  
2. Составление (синтез) структурной логической схемы надежности (структуры системы), основанное на анализе функционирования системы (какие блоки включены, в чем состоит их работа, перечень свойств исправной системы и т.п.), и выбор метода расчета надежности.

3. Составление математической модели, связывающей рассчитываемые показатели системы с показателями надежности элементов.

4. Выполнение расчета, анализ полученных результатов, корректировка расчетной модели.

Состав рассчитываемых показателей:

Системы с невосстанавливаемыми элементами

- средняя наработка до отказа ( $T_{0c}$ );

- ВБР к заданной наработке  $P_c(t)$ ;

- ИО к заданной наработке  $\lambda_c(t)$ ;

- ПРО к заданной наработке  $f_c(t)$ .

Системы с восстанавливаемыми элементами

-  $T_{0c}$ ;  $P_c(t)$ ; коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, параметр потока отказов.

## ТЕМА 8. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

План лекции:

1) Вероятность безотказной работы и вероятность отказов.

2) Плотность распределения времени работы изделия до его отказа. Частота отказов.

3) Интенсивность отказов. Выражение вероятности и частоты отказов через интенсивность отказов.

#### 4) Среднее время безотказной работы.

##### 1. Вероятность безотказной работы и вероятность отказов.

Статистическая оценка ВБР (эмпирическая функция надежности) определяется отношением числа  $N(t)$  объектов, безотказно проработавших до момента наработки  $t$ , к числу объектов, исправных к началу испытаний ( $t = 0$ ) - к общему числу объектов  $N$ . Оценку ВБР можно рассматривать как показатель доли работоспособных объектов к моменту наработки  $t$ .

Функция  $P(t)$  выражает вероятность того, что в течение требуемого времени работы  $t$  не будет отказа машины или комплекса, т.е. вероятность, с которой  $T \geq t$ .

В статистическом определении оценка вероятность отказа представляет эмпирическую функцию распределения отказов.

Так как события, заключающиеся в наступлении или не наступлении отказа к моменту наработки  $t$ , являются противоположными, то:

$$\hat{P}(t) + \hat{Q}(t) = 1$$

ВБР является убывающей, а ВО – возрастающей функцией наработки.

##### 2. Плотность распределения времени работы изделия до его отказа. Частота отказов.

Статистическая оценка ПРО определяется отношением числа объектов  $\Delta n(t, t + \Delta t)$ , отказавших в интервале наработки  $[t, t + \Delta t]$  к произведению общего числа объектов  $N$  на длительность интервала наработки  $\Delta t$ .

Вероятностное определение ПРО следует из статистического определения при стремлении интервала наработки  $\Delta t \rightarrow 0$  и увеличения объема выборки  $N \rightarrow \infty$ .

ПРО по существу является плотностью распределения (плотностью вероятности) случайной величины  $T$  наработки объекта до отказа.

Поскольку  $Q(t)$  является неубывающей функцией своего аргумента, то  $f(t) \geq$

##### 3. Интенсивность отказов. Выражение вероятности и частоты отказов через интенсивность отказов.

Статистическая оценка ИО определяется отношением числа объектов  $\Delta n(t, t + \Delta t)$ , отказавших в интервале наработки  $[t, t + \Delta t]$  к произведению числа  $N(t)$  работоспособных объектов в момент  $t$  на длительность интервала наработки  $\Delta t$ .

ИО несколько полнее характеризует надежность объекта на момент наработки  $t$ , т.к. показывает частоту отказов, отнесенную к фактически работоспособному числу объектов на момент наработки  $t$ .

## ТЕМА 9. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

План лекции:

1) Вероятность безотказной работы и вероятность отказов, средняя частота отказов, наработка на отказ.

Вероятность безотказной – вероятности того, что в пределах заданной наработки отказ изделий не возникает (ГОСТ 27002-89).

Средняя наработка на отказ – это отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа отказов в течение этой наработки.

## ТЕМА 10. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

План лекции:

1) Коэффициенты готовности, вынужденность простоев и технического использования, профилактики; среднее время восстановления; удельная трудоемкость капитального ремонта; удельная стоимость восстановления, текущих и капитальных ремонтов.

2) Коэффициенты отказов, относительный коэффициент отказов и расхода элементов; коэффициент относительных простоев.

Физическая сущность коэффициента готовности заключается в том, что он представляет собой вероятность работоспособного состояния машины или комплекса в любой произвольный момент времени.

Коэффициент готовности, определяемый для случая, когда суммарное время устранения отказов машины составляет полную сумму всех возможных потерь времени при ликвидации отказов, следует называть коэффициентом эксплуатационной готовности  $K_{Э.Н.}$

Коэффициент готовности, определяемый с учетом показателя технического времени восстановления, следует называть коэффициентом технической готовности  $K_{Т.Н.}$

С помощью коэффициента  $K_{Т.Н.}$  учитывается влияние надежности машин на их техническую производительность. Величина коэффициента технической надежности должна указываться в технических характеристиках машин.

Вероятность того, что в произвольный момент времени  $t$  устройство не будет работоспособно, называется функцией простоя.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления объекта.

Вероятность восстановления работоспособного состояния – это вероятность того, что объект будет восстановлен в заданное время  $t_v$ .

## ТЕМА 11. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

План лекции:

- 1) Ресурс и срок службы. Прогнозирование ресурса оборудования отказов.
- 2) Прогнозирование ресурса оборудования отказов. Интенсивность и параметры потока отказов. Виды потоков отказов: простейший, нестационарный, пуассоновский поток, потоки Пальма и Эрланга.

### 1. Ресурс и срок службы

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

Гамма-процентный ресурс представляет собой наработку, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный ресурс является основным расчетным показателем для подшипников и ряда других элементов. Существенное достоинство этого показателя – возможность его определения до завершения испытаний всех образцов. В большинстве случаев для различных элементов используют 90% ресурс. Если отказ влияет на безопасность, то гамма ресурс приближается к 100%.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой применение объекта по назначению должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

Под установленным ресурсом понимается технически обоснованная или заданная величина ресурса, обеспечиваемая конструкцией, технологией и эксплуатацией, в пределах которой объект не должен достичь предельного состояния.

Средний срок служб – математическое ожидание срока служб.

Гамма-процентный срок служб представляет собой календарную продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Назначенный срок служб – суммарная календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой применение объекта по назначению, должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

Под установленным сроком служб понимают технико-экономически обоснованный или заданный срок служб, обеспечиваемый конструкцией, технологией изготовления и эксплуатацией, в пределах которого объект не должен достичь предельного состояния.

2. Интенсивность и параметры потока отказов. Виды потоков отказов: простейший, нестационарный, пуассоновский поток, потоки Пальма и Эрланга.

Для ремонтируемых ТС (с восстановлением) представляет интерес изучение последовательности случайных событий, которые представляют собой повторяющиеся отказы, следующие за многократными восстановлением.



Последовательность отказов называется потоком отказов.

Важнейшей характеристикой потока отказов является математическое ожидание числа отказов на интервале  $(0, t)$ . Эта характеристика называется ведущей функцией потока отказов.

Потоки отказов являются ординарными, т.е. вероятность совмещения в один и тот же момент двух и более отказов пренебрежимо мала.

$\Omega(t)$  обладает следующими свойствами:

1. для любого момента времени независимо от закона распределения времени безотказной работы (БР)  $\Omega(t) > \omega(t)$ ;
2. независимо от вида функции  $\omega(t)$  параметр потока отказов  $\Omega(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  стремится к  $1/T_{ср}$ ;
3. если  $\lambda(t)$  – возрастающая функция времени, то  $\lambda(t) > \Omega(t) > \omega(t)$ ; если  $\lambda(t)$  – убывающая функция времени, то  $\Omega(t) > \lambda(t) > \omega(t)$ ;
4. при экспоненциальном законе распределения времени БР, т.е. при  $\lambda(t) = \lambda = const$ , параметр потока.

## ТЕМА 12. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ ГРУПП ДЕТАЛЕЙ МАШИН

План лекции:

- 1) Надежность соединений с натягом.
- 2) Надежность сварных соединений.
- 3) Надежность резьбовых соединений.
- 4) Надежность зубчатых передач.
- 5) Надежность валов.
- 6) Надежность подшипников качения.

### 1. Надежность соединений с натягом

Надежность соединения с натягом рассчитывается по причине изменения величины натяга изменяемого в процессе работы узла по причине нестабильности коэффициентов трения вызванных изменением состояния поверхности (появление оксидных пленок попадание масла и т.д.), а также внешними нагрузками.

Вероятностный расчет работоспособности и надежности соединения с натягом сводится к оценке вероятности  $P$  безотказной работы по критерию прочности сцепления, вероятности безотказной работы по критериям прочности деталей.

### 2. Надежность сварных соединений

В ряде машин, частности горных машин, надежность конструкций в значительной степени определяется сопротивлением усталости сварных соединений.

Следует отметить, что на усталостную прочность сварного соединения значительное влияние оказывает качество подготовки деталей под сварку (разброс угла разделки кромок, разброс зазора между кромками, степень не-

совпадения стыкуемых поверхностей, загрязнение кромок), наличие поверхностных дефектов шва (подрезов, кратеров, прижогов), неоднородность шва (наличие пор, шлаковых включений, несплавлений, непроваров, трещин). Выше приведенный расчет предполагает качественное выполнение шва, что обеспечивается контролем подготовительных операций, режима сварки и применением различных методов дефектоскопии (радиационного, ультразвукового, магнитного, капиллярного) после сварки. В случаях, если контроль не обеспечен, неоднородность шва может существенно понизить показатели надежности соединения.

### 3. Надежность резьбовых соединений

Надежность резьбовых соединений необходимо определять в связи с большим рассеянием нагрузок, предела выносливости болтов, разбросом их ударной прочности при низких температурах и с недостаточной надежностью многих применяемых средств стопорения. Специфика расчета резьбовых соединений на надежность сведена к учету рассеяния начальной затяжки и рассеяния концентрации напряжений.

Вероятностный расчет работоспособности и надежности болтового соединения сводится к оценке вероятности  $P$  безотказной работы соединения, вероятности безотказной работы по критериям нераскрытая стыка, несдвигаемости стыка, прочность болтов.

### 4. Надежность зубчатых передач

Вероятность безотказной работы по критерию сопротивления контактной усталости определяется как вероятность того что контактное напряжение  $\sigma_H$  не превысит предела контактной выносливости предельного значения расчетного параметра  $\sigma_{lim}$ .

Зубчатое колесо можно рассматривать как последовательную систему состоящую из  $z$  элементов – зубьев. Разрушение колеса отождествляется с разрушением наименее прочного зуба – слабого звена.

Среднее значение и коэффициент вариации предела выносливости наименее прочного зуба меньше, чем аналогичные характеристики предела выносливости зубьев это учитывается введением коэффициента  $K_z$  и  $\alpha_z$ .

### 5. Надежность валов

Валы должны удовлетворять условиям прочности и жесткости.

Из критериев прочности для большинства валов современных быстроходных машин решающее значение имеет сопротивление усталости. Усталостные разрушения составляют до 40...50% случаев выхода валов из строя. При работе со значительными перегрузками может проявляться малоцикловая усталость. При единичных очень больших перегрузках валы из нормализованных и улучшенных сталей могут выходить из строя из-за недопустимых пластических деформаций, а валы из хрупких и малопластичных материалов – из-за хрупких разрушений.

### 6. Надежность подшипников качения

Вероятность безотказной работы отождествляем с вероятностью выполнения известного условия:

$$PL^{1/p} < C,$$

где  $P$  – динамическая эквивалентная нагрузка;  
 $C$  – динамическая грузоподъемность;  
 $L$  – заданный ресурс;  
 $p$  – показатель степени, равный 3 – для шарикоподшипников и 10/3 – для роликоподшипников.

Коэффициент вариации динамической эквивалентной нагрузки  $v_p$  принимаем, равным коэффициенту вариации внешней нагрузки, действующей на подшипник. Рекомендация основана на равенстве коэффициентов вариации случайных величин, связанных между собой линейной зависимостью.

### ТЕМА 13. ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

План лекции:

- 1) Значение и виды испытаний на надёжность
- 2) Планы испытаний на надёжность Информация о надёжности по результатам испытаний

#### 1. Значение и виды испытаний на надёжность

Для создания экономичных и надежных машин на уровне мировых образцов необходимо проводить всестороннюю оценку узлов, деталей и машины в целом на стадии изготовления, как опытных образцов, так и серийных машин по данным испытаний.

В соответствии с ГОСТ 16504-70 виды испытаний классифицируются по следующим признакам: по целям, куда относятся контрольные испытания (предварительные, государственные, межведомственные, приемо-сдаточные, периодические, типовые), исследовательские (аттестационные, граничные); по срокам проведения – ускоренные, неускоренные; по методу проведения – разрушающие, неразрушающие; по этапам – на этапе производства, эксплуатационные.

Особое место в общей оценке машин занимают испытания:

на надёжность опытных образцов (определятельные);

на надёжность серийных образцов (контрольные);

ресурсные;

ускоренные.

2. Планы испытаний на надёжность Информация о надёжности по результатам испытаний

В соответствии с ГОСТ 17510-72 предусматриваются следующие основные планы проведения наблюдений  $[N, U, N]$ ,  $[N, U, T]$ ;  $[N, U, r]$ ,  $[N, R, T]$  и  $[N, R, r]$ , где  $N$  – число изделий, поставленных под наблюдение;  $U$  – планы, в которых отказавшие изделия не заменяются новыми;  $T$  – установленная наработка или календарная продолжительность наблюдений;  $r$  – число отказов или предельных состояний, до возникновения которых ведутся наблюдения;

R – планы, в которых отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются.

## ТЕМА 14. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

План проведения

- 1) Расчет надежности. Целевое назначение классификация.
- 2) Расчет надежности с учетом внезапных отказов (приближенный и коэффициентный).
- 3) Расчет надежности с учетом внезапных и постепенных отказов.
- 4) Расчет фактической надежности с учетом реальных условий эксплуатации.

### 1. Расчет надежности. Целевое назначение классификация

Рассчитать надежность экскаваторов – значит определить количественные характеристики надежности по известным эксплуатационным характеристикам деталей, узлов и аппаратов.

При расчете надежности экскаваторов существенное значение имеет выбор числа деталей и узлов, которые должны быть учтены. В экскаваторах имеются детали и узлы, выход из строя которых приводит лишь к ухудшению некоторых характеристик его работы, например, точность и качество переходных процессов в главных приводах и т.д. Отказ же других деталей приводит к нарушению или даже к прекращению работы экскаватора. Таким образом, с точки зрения надежности детали и узлы экскаваторов не равноценны. Поэтому при расчете надёжности экскаваторов нужно учитывать только те детали и узлы, выход из строя которых приводит к отказу всей машины. Следовательно, прежде чем приступить к расчету надежности, нужно четко сформулировать, что следует понимать под отказом экскаватора и его деталей.

### 2. Расчет надежности с учетом внезапных отказов (приближенный и коэффициентный)

Приближенный расчет надежности подразделяется на предварительный и окончательный расчеты.

Предварительный ориентировочный расчет обычно выполняется на этапе эскизного проектирования, когда сравниваются различные варианты электрической или кинематической схем по ожидаемой надежности.

Окончательный ориентировочный расчет осуществляется на этапе опытно-промышленного производства, когда имеются окончательные компоновки узлов, электрическая и кинематическая схемы, а также результаты испытаний опытного образца машины.

В основе коэффициентного метода расчета заложены следующие допущения:

а) время возникновения отказов является простейшим потоком случайных событий, удовлетворяющих условиям стационарности, ординарности, отсутствия последствия и финитности;

б) параметр потока отказов всех деталей изменяется одинаково в зависимости от условий эксплуатации.

Коэффициентный метод расчета позволяет сравнивать по надежности машины или их узлы, зная при этом только количество деталей данного типа и коэффициенты их надежности.

При пользовании коэффициентным методом расчета надежности следует придерживаться следующих правил.

1. Формулируется понятие отказа системы.
2. Составляется схема расчета надежности.
3. Выбирается основная деталь машины, т. е. такая, параметр потока отказов которой известен достоверно.

3. Расчет надежности с учетом внезапных и постепенных отказов.

В общем случае вероятность безотказной работы машины с учетом внезапных, приработочных и постепенных (наносных) отказов в течение произвольного отрезка времени (например, за межремонтный период, т.е. за период между двумя соседними ремонтами) можно определить с помощью выражения:

$$P(t) = P_m(t)P_B(t)P_{np}(t)$$

4. Расчет фактической надежности с учетом реальных условий эксплуатации

В настоящее время для горнодобывающих предприятий особую ценность (представляют материалы, характеризующие фактическую надежность экскаваторов в реальных условиях эксплуатации. При наличии таких материалов можно:

а) рассчитать возможные нагрузки на детали и узлы экскаваторов, затраты времени и средств на устранение отказов и проведение технического обслуживания;

б) выявить узлы и детали экскаваторов, надежность которых Должна быть повышена в первую очередь;

в) определить наиболее рациональные режимы эксплуатации экскаваторов;

г) установить оптимальные периоды технического обслуживания и замены деталей и узлов;

д) сравнивать различные типы экскаваторов по надежности;

е) определить рациональный уровень квалификации обслуживающего и ремонтного персонала;

ж) обосновать норматив расхода запасных частей и материалов на ремонтно-эксплуатационные нужды экскаваторов;

з) наметить пути повышения надежности находящихся в эксплуатации экскаваторов.

Поэтому правильная организация сбора фактических материалов по (ремонту и эксплуатации экскаваторов, систематизация и тщательная статистическая обработка их имеет большое значение.

## ТЕМА 15. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НА НАДЕЖНОСТЬ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ

План лекции:

- 1) Влияние условий эксплуатации, технического обслуживания структуры и режимов управления на эксплуатационную надежность.
- 2) Методы повышения надежности.

1. Влияние условий эксплуатации, технического обслуживания структуры и режимов управления на эксплуатационную надежность.

Надежность экскаваторов в условиях открытых горных разработок зависит от большого количества факторов: горнотехнических, погодноклиматические условия эксплуатации, системы технического обслуживания, влияния структуры и режимов управления.

### 2. Методы повышения надежности

Надежность карьерных экскаваторов, как и любой другой технической системы, закладывается при конструировании и обеспечивается в процессе эксплуатации. Поэтому мероприятия по повышению их надежности должны приводиться как в процессе конструирования и производства самих экскаваторов и их деталей, так и в процессе эксплуатации.

Методы повышения эксплуатационной надежности карьерных экскаваторов могут быть разделены на три группы:

- методы, используемые при конструировании;
- методы, используемые при производстве;
- методы, используемые при эксплуатации.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Острейковский, В.А. Теория надежности / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003.
2. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин / И.М. Жарский [и др.]. – Минск: Вышэйшая школа, 2005.
3. Кравченко, И.Н. Основы надежности машин: в 2 ч. Ч. I / И.Н. Кравченко, В.А. Зорин, Е.А. Пучин. – М.: Изд-во ВТУ при Федеральном агентстве специального строительства, 2006. – 224 с.
4. Надежность и ремонт машин / В.В. Курчаткин, Н.Ф. Тельнов, К.А. Ачкасов [и др.]; под ред. В.В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776 с
5. Кравченко, И.Н. Основы надежности машин: в 2 ч. Ч. II / И.Н. Кравченко, В.А. Зорин, Е.А. Пучин. – М.: Изд-во ВТУ при Федеральном агентстве специального строительства, 2006. – 260 с.
6. Труханов, В.М. Надежность технических систем: учеб. для вузов / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 2003. – 320 с.
7. Половко, А.М. Основы теории надежности: практикум / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВПетербург, 2006. – 560 с.
8. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем: учеб. для студентов высших учеб. заведений / В.Ю. Шишмарев. – М.: Академия, 2010. – 304 с.