



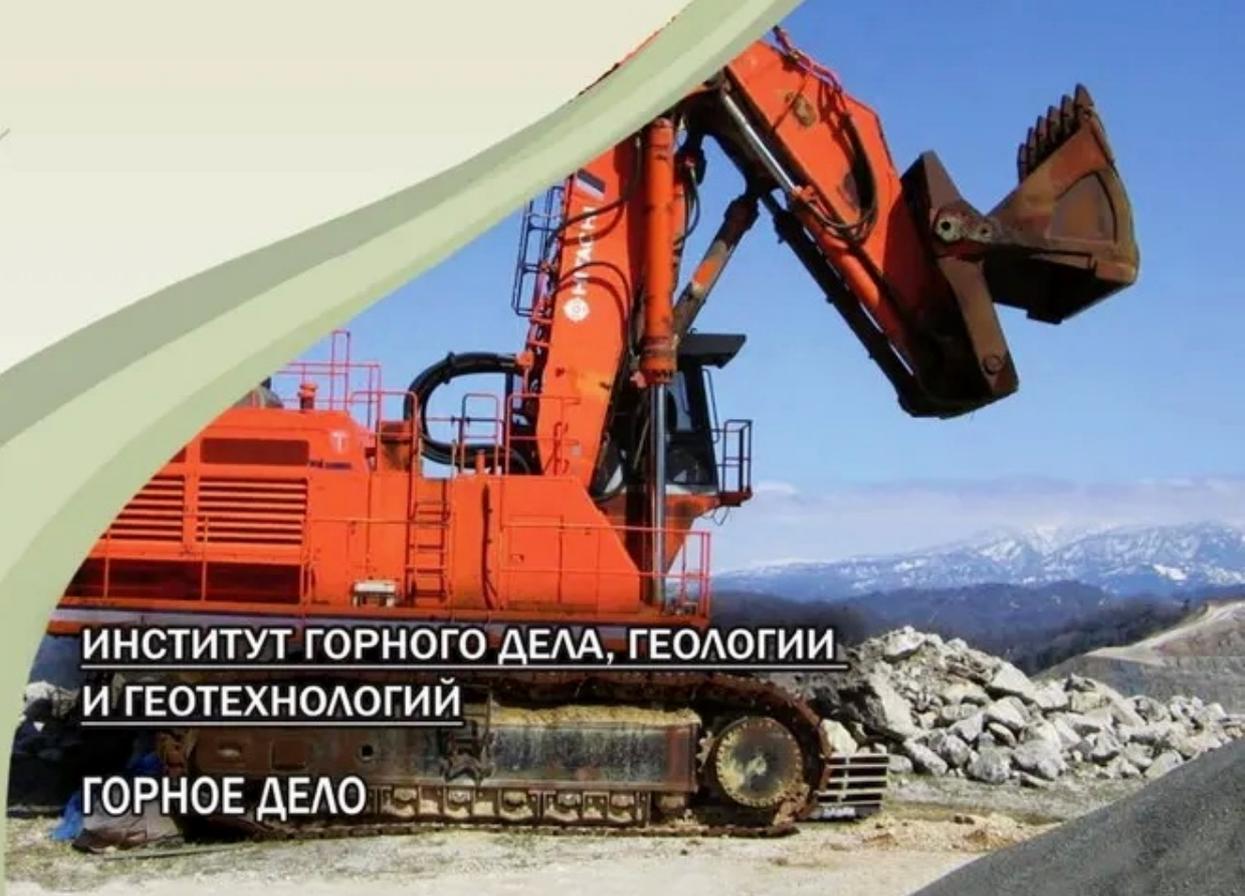
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

В.А. Карепов, Е.В. Безверхая, В.Т. Чесноков

НАДЕЖНОСТЬ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное
пособие

УМО



**ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА, ГЕОЛОГИИ
И ГЕОТЕХНОЛОГИЙ**

ГОРНОЕ ДЕЛО

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

В.А. Карепов, Е.В. Безверхая, В.Т. Чесноков

НАДЕЖНОСТЬ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области горного дела в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Горное дело», 22.11.2011

Красноярск
СФУ
2012

УДК 622.232(07)
ББК 33–5я73
К22

Рецензенты:

зам. директора СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН,
доктор технических наук, профессор А.М. Лепихин;
зав. лабораторией «Проблемы освоения недр» Института химии
и химической технологии СО РАН,
доктор технических наук, профессор А.Г. Михайлов;
профессор-консультант ФГАОУ ВПО СФУ, доктор технических наук,
профессор, заслуженный деятель науки РФ В.Д. Буткин

Карепов В.А.

К22 Надежность горных машин и оборудования: учеб. пособие /
В.А. Карепов, Е.В. Безверхая, В.Т. Чесноков. – Красноярск: Сиб.
федер. ун-т, 2012. – 134 с.
ISBN 978-5-7638-2651-7

В учебном пособии рассмотрены методики определения показателей надежности, физическая природа и причины возникновения отказов, их виды и классификация. Особое внимание уделено обеспечению надежности машин на стадии их проектирования, приведены методы поддержания надежности при изготовлении и эксплуатации машин.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 130400 «Горное дело».

УДК 622.232(07)
ББК 33–5я73

ISBN 978-5-7638-2651-7

© Сибирский федеральный университет, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Надежность изделий является основным показателем их качества. Проблема обеспечения надежности продукции возникла в 50-х гг. прошлого столетия применительно к радиоэлектронным устройствам, состоящим из большого числа элементов. Современные технологические машины открытых и подземных горных работ также состоят из большого количества узлов и деталей, снабжаются автоматическими и электронными системами управления и контроля.

Требования к надежности промышленных изделий, в том числе к надежности горных машин, постоянно возрастают. Было выпущено значительное количество публикаций по данному вопросу, большинство из них посвящено стадии эксплуатации техники и часть – вопросам расчета надежности изделий на стадии их разработки. Однако надежность является комплексным понятием, создается и поддерживается на всех стадиях формирования изделия: при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

При организации работ по отработке надежности следует исходить из того, что надежность закладывается на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, обеспечивается при серийном производстве, поддерживается и восстанавливается при техническом обслуживании и ремонте, реализуется при использовании по назначению.

Создание надежных машин требует ускоренных ресурсных испытаний, при которых выявляются отказы наименее надежных деталей и узлов. Но для горных технологических машин эти испытания могут быть осуществлены лишь частично, да и то в основном для узлов, требующих дорогостоящего оборудования и приборной базы стоимостью до десяти миллионов рублей. Для многих предприятий-изготовителей техники это трудноосуществимо, что обрекает их на чрезмерно длительные периоды доводки машин после анализа данных об их реальной эксплуатации. В результате машина доводится тогда, когда ее уже нужно снимать с производства, как морально устаревшую.

Целью курса «Надежность машин» является изучение теории, которая позволяет на стадиях проектирования с относительно низкими затратами рассчитать основные ресурсные, временные и стоимостные показатели будущей машины, показать, какими методами мож-

но обеспечивать и поддерживать эти показатели на стадии изготовления и эксплуатации машин.

В курсе надежности машин и оборудования изучаются:

1. Закономерности возникновения отказов и способы их устранения.

2. Влияние внешних и внутренних воздействий на процессы, происходящие в изделиях.

3. Методы количественного определения показателей и оценки надежности.

4. Мероприятия по повышению надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации изделия.

Теория надежности – комплексная наука, относящаяся к компетенции инженера и экономиста. Для решения значительной части вопросов при расчетах используются методы теории вероятности и математической статистики.

Содержание учебного пособия соответствует программам курсов надежности для студентов курсов направления 130400.65 «Горное дело», изучающих вопросы проектирования, изготовления, монтажа, наладки, эксплуатации горных машин.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Основные положения

Уровень надежности изделия нельзя связывать с изделиями, вырабатывающими весь свой заданный ресурс. Уровень надежности характеризуется затратами на освоение изделия, его отработку, изготовление и эксплуатацию. Поэтому надежность должна иметь интервальную оценку и назначаться такой, какая необходима в каждом конкретном случае.

Так, например, ресурс ходовой части танка или двигателей самолетов имеет строго ограниченный заданный ресурс, отличный от транспортных машин. Вместе с тем большой ряд сложных машин, систем, комплексов не допускает даже единичных отказов, так как резко снижается экономический эффект от применения новой техники. Отказ одного из элементов ЭВМ способен привести к остановке всего вычислительного комплекса или производственного процесса.

Первые исследования по надежности относятся к концу Второй мировой войны. Основанием послужили факты отказов электронных систем самолетов и устройств военно-морского флота США (до 70 % электронных устройств в начальный период их эксплуатации после 20 ч работы).

Отечественный и зарубежный опыт повышения надежности машин показывает, что наибольший эффект достигается, когда соблюдаются следующие требования:

- надежность изделия закладывается при его проектировании;
- заданные показатели надежности закладываются в техническом задании на изделие, они должны быть не ниже стандартных, на уровне лучших зарубежных аналогов,
- новые модификации изделий должны подвергаться отработке на надежность;
- отработка на надежность должна включать комплекс конструктивных и технологических мероприятий, выполнение рас-

четов и испытаний, установлений правил пользования, состав и комплектность запасных частей по годам и на весь срок службы изделий;

- допуск к серийному производству должен производиться после подтверждения нормируемых техническим заданием показателей надежности;
- испытания на надежность должны быть комплексными, включать стендовые испытания, узловые, эксплуатационные;
- проведение расчетов по надежности должно выполняться в процессе проектирования, до испытаний, по современным методикам, заложенным стандартами по надежности.

1.2. Система стандартов «надежность в технике»

Система стандартов «Надежность в технике» (ССНТ) предназначена для нормативного обеспечения методов, мероприятий и средств, направленных для достижения требуемого уровня надежности изделий.

ССНТ должна обеспечивать эффективность организационных, конструкторских, технологических и эксплуатационных мероприятий для достижения оптимального уровня надежности машин, объективных и сопоставимых результатов контроля и испытаний машин на надежность.

В систему стандартов входят стандарты, разделяющиеся на 5 групп и имеющих свой код:

«0» – общие вопросы надежности;

«1» – нормирование надежности по номенклатуре, показателям, критериям отказов;

«2» – методы расчетов надежности, в том числе и норм запасных частей;

«3» – методы обеспечения надежности при конструировании, изготовлении и эксплуатации;

«4» – испытания и контроль надежности;

«5» – сбор и обработка информации по надежности.

Государственный стандарт ССНТ обозначения представлен следующей схемой:



Примеры обозначения стандартов ССНТ:

ГОСТ 27.001–81 Система стандартов «надежность в технике».

Основные положения.

ГОСТ 27.002–89 Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения.

ГОСТ 27.209–85 Надежность в технике. Технологические системы. Расчет надежности по параметрам производительности.

ГОСТ 27.410–87 Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и плана контрольных испытаний на надежность.

1.3. Термины и определения

Термины устанавливаются стандартами ГОСТ 21623–86; ГОСТ 16504–81; ГОСТ 27.002–89 и ГОСТ 18322–87. Они обязательны к применению для всех видов техдокументации и литературы. Для каждого понятия стандартизован один термин и применение терминов – синонимов не допускается.

Технический объект (изделие) – предмет, подлежащий расчету, анализу, испытанию и исследованию в процессе его проектирования, изготовления, применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования в целях обеспечения эффективности его функционального назначения.

Механическая система (система) – сложный объект, представляющий собой совокупность взаимосвязанных функционально и расположенных в определенном порядке объектов. Это могут быть машины, агрегаты, сборочные единицы, которые в зависимости от цели

исследования могут входить в более сложную механическую систему в качестве подсистемы или элемента.

Элемент (механической системы) – объект, представляющий собой часть системы в конкретном исследовании. Элементами могут быть детали, сборочные единицы, агрегаты и даже машины, если они в исследовании (расчете) представлены только признаками и характеристиками, без раскрытия их внутреннего содержания.

Понятие система и элемент системы должны рассматриваться как целое и часть в конкретном исследовании, и поэтому эти понятия относительны. Что было системой в отношении части, то будет элементом при рассмотрении целого.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Это свойство определяет эффективность функционирования изделия во времени через свои показатели. Надежность, являясь комплексным свойством, оценивается через показатели частных свойств – долговечности, безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости, каждого в отдельности или в различных их сочетаниях.

Безотказность – свойство объекта сохранять работоспособность непрерывно в течение некоторого времени или наработки. Проявляется как в режиме работы, так и в режиме ожидания.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до предельного состояния с возможными перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Долговечность разделяют на физическую и моральную.

Физическая долговечность – это продолжительность работы машины в средних условиях эксплуатации до капитального ремонта или списания. Списание производится тогда, когда эксплуатация становится опасной, технически невозможной, а восстановление экономически нецелесообразным.

Моральная долговечность – это продолжительность работы машины, после которой ее конструкция становится технически и экономически неэффективной по сравнению с новыми типами машин.

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

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение и после режимов ожидания, хранения и транспортирования. Изделие в период его применения (эксплуатации) может находиться в исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном состояниях. Особое состояние изделия – его предельное состояние. Переход из одного состояния в другое характеризуется событиями – повреждением или отказом.

Исправное состояние (исправность) – состояние объекта, при котором он удовлетворяет всем требованиям нормативно – технической документации (НТД).

Неисправное состояние (неисправность) – состояние объекта, при котором он не удовлетворяет хотя бы одному из требований НТД.

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние объекта, при котором изделие способно выполнять заданные функции, соответствующие требованиям НТД.

Неработоспособное состояние (неработоспособность) – состояние объекта, при котором не выполняется хотя бы один параметр заданных функций изделия, указанных в требованиях НТД.

Предельное состояние – состояние объекта, при достижении которого его дальнейшее применение (эксплуатация) по назначению недопустимо, невозможно, или нецелесообразно.

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

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Причина отказа – явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа.

Ремонтируемый объект – объект, для которого возможность проведения ремонтов и технического обслуживания предусмотрены НТД.

Неремонтируемые объекты – объекты, для которых ремонты и техобслуживание не предусмотрены НТД.

Абсолютное большинство машин и их сборочных единиц относятся к ремонтируемым. К неремонтируемым могут быть отнесены подшипники качения, ременные и зубчатые передачи, рукава высокого давления, манжеты и уплотнения, фрикционные накладки, пружины и др.

Величина, характеризующая одно из свойств или несколько свойств надежности, называется *показателем надежности*.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта.

Ресурс – наработка объекта от начала его применения до предельного состояния.

Критерием исправного состояния являются установленные нормативно-технической документацией параметры технической характеристики изделия, а также параметры внешнего вида, комфортности, обзорности, удобства управления и другие определения качества изделия.

Критерием работоспособного состояния являются параметры техники безопасности, технической характеристики изделия, установления НТД для заданных условий режимов применения.

Критерием неисправного состояния является выход за установленные пределы хотя бы одного параметра, но при этом работоспособность изделия сохраняется полностью в режимах, оговоренных в НТД.

Критерием неработоспособного состояния является выход за установленные пределы НТД значения хотя бы одного параметра технической характеристики или при появлении дефекта, являющегося по признакам НТД отказом.

Критерием предельного состояния является также его неработоспособное состояние, при котором по установленным НТД признакам фиксируется факт недопустимости или невозможности дальнейшего применения изделия по назначению, необходимости его замены или списания.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации изделия от начала эксплуатации до наступления предельного состояния.

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения или транспортирования изделия в заданных условиях, в течение и после которой сохраняются исправность и свойства надежности.

Оперативное время восстановления – затраты времени каждого исполнителя на выполнение операций по восстановлению работоспособности изделия, определяемые его конструкцией и техническим состоянием.

Оперативная продолжительность восстановления – время проведения операций по восстановлению работоспособности изделия, определяемое его конструкцией, техническим состоянием и приспособленностью к одновременному выполнению работы несколькими исполнителями.

Оперативная трудоемкость восстановления – сумма затрат времени всех участвующих в восстановлении работоспособности изделия исполнителей при выполнении ими операции восстановления.

Оперативная стоимость восстановления – стоимость выполнения операций восстановления работоспособности изделия, определяемая его конструкцией, техническим состоянием и квалификацией всех участвующих исполнителей.

1.4. Актуальность повышения надежности технологических машин и комплексов

Для современных горных машин и оборудования характерны повышенные нагрузки, скорости, температуры, давления, увеличение степени автоматизации и контроля. При этом наблюдается снижение габаритов и удельной массы машин, повышение КПД, точности выполнения заданных функций. Это приводит к увеличению сложности технических устройств и к необходимости повышения их качества и надежности.

Проблема надежности машин и их узлов приобрела особую значительность вследствие ряда причин.

1. Увеличение сложности современных механических систем.

Системы автоматического управления современными металлургическими и химическими производствами содержат от 70 до 250 тысяч электрических компонентов [1].

2. Усиление интенсивности режимов работы систем и их элементов.

Интенсивность режимов работы характеризуется высокими температурами, давлениями, скоростями, нагрузками. Примером могут служить двигатели внутреннего сгорания. Удельный вес (кг/л.с) и интенсивность режимов за последние 70 лет увеличились в 180 раз.

3. Повышение требований к качеству и точности работы изделий.

На ремонт и восстановление отказавшей техники затрачиваются большие материальные и трудовые ресурсы. Например, в тракторостроении до 75 % производственных мощностей заняты ремонтом техники, на выпуске новой техники работает 25 %. В России на восстановление техники тратится 20 % выплавляемых черных металлов [2].

4. Усиление ответственности выполняемых функций.

Отказы многих механических систем приводят к крупным экономическим потерям, превышающим стоимость отказавшего оборудования, а иногда и к катастрофам. Отказ одного элемента контроля на Чернобыльской АЭС привел к катастрофической аварии.

5. Полная или частичная автоматизация многих процессов.

Автоматизация предполагает работу машин и оборудования без наблюдения и контроля со стороны человека, а это предъявляет дополнительные требования к их надежности.

Теория надежности предусматривает выбор оптимальных технических решений при проектировании, конструировании, изготовлении, транспортировке, хранении, монтаже, эксплуатации, техобслуживании и ремонте изделий. Она устанавливает и изучает общие принципы и методы оценки надежности, количественные характеристики надежности, исследует связь между показателями экономичности, эффективности и надежности, методы обоснования норм запасных частей.

Теория надежности развивается в двух направлениях:

- вероятно-статистическом, основанном на теории вероятности и математической статистике;
- детерминированном, связанном с исследованиями физики отказов механических систем, элементов конструкции, конструкционных материалов.

По первому направлению разработаны математические методы оценки надежности, статистической обработки результатов испытаний, планирования испытаний, контроля и прогнозирования надежности.

По второму направлению изучены механизмы износа, усталостной прочности, коррозии, старения и других физико-химических процессов, оказывающих основное влияние на надежность изделий. Разработаны методики расчета на прочность и износ.

Одной из основ теории надежности являются результаты исследования износа, старения и изменения свойств материалов элементов изделий при взаимодействии с контактируемой с ними средой (изоляция, смазка, топливо и т. д.), т. е. физическая природа отказов.

Надежность изделия является комплексным свойством. Она характеризуется его безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Требования к надежности изделий определяются в технических заданиях, стандартах, технических условиях на изделия.

Первичные характеристики свойств и состояний изделий, такие как отказ, наработка до отказа, время восстановления работоспособности, имеют случайный характер появления, и получить достоверные количественные показатели свойств надежности изделия можно лишь при большом количестве статистических данных, наблюдая изделие в течение продолжительного времени его эксплуатации. В связи с этим для количественной оценки свойств надежности изделий применяют статистические и вероятностные аспекты, которые и используют для оценки состояния изделия или для прогнозирования его состояния и ресурса.

1.5. Единичные показатели надежности

Единичный показатель характеризует одно из свойств надежности. Стандартом (ГОСТ 27.002–89) предусмотрены следующие единичные показатели надежности:

- показатели безотказности: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка на отказ, параметр потока отказов;
- показатели долговечности: средний ресурс, гамма-процентный ресурс, назначенный ресурс, установленный ресурс, средний срок службы, гамма-процентный срок службы, назначенный срок службы, установленный срок службы;
- показатели ремонтпригодности: среднее время восстановления работоспособности, вероятность восстановления, удельная суммарная трудоемкость восстановления работоспособного состояния;
- показатели сохраняемости: средний срок сохраняемости, гамма-процентный срок сохраняемости, назначенный срок хранения, установленный срок хранения.

Фактически необходимую номенклатуру показателей надежности выбирают исходя из класса изделия, режимов эксплуатации, характера и последствия отказов. Для каждого конкретного изделия выбирают минимально необходимое число показателей, в достаточной степени определяющих его надежность. При выборе показателей надежности необходимо также руководствоваться государственными стандартами и нормативно-техническими документами отрасли.

Показатели безотказности

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникает. Она выражается в виде десятичной дроби или в процентах.

Если изделие работает от момента времени $t = 0$ до момента времени $t=t$, при котором происходит отказ, то интервал наработки от 0 до t называется наработкой до отказа. Нарботка до отказа является непрерывной случайной величиной, распределяемой по закону вероятности возникновения отказов $Q_{(t)}$. Функция $Q_{(t)}$ есть вероятность появления отказа изделия до времени t . Так как изделие может находиться либо в работоспособном состоянии или в состоянии отказа, то эти состояния образуют полную несовместную группу событий, а сумма их вероятностей равна единице: $P_{(t)} + Q_{(t)} = 1$.

Характер кривой функции $P_{(t)}$ показан на рис. 1.1.

Эта функция $P_{(t)} \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Статистической оценкой вероятности безотказной работы $P_{(t)}$ является отношение числа работоспособных изделий N , к моменту t , к общему числу N_0 изделий, взятых под наблюдение при испытаниях.

$$P_{(t)} \approx P_t^1 = \frac{N_1}{N_0}. \quad (1.1)$$

При увеличении числа N_0 функции P_t и P_t^1 будут приближаться друг к другу.

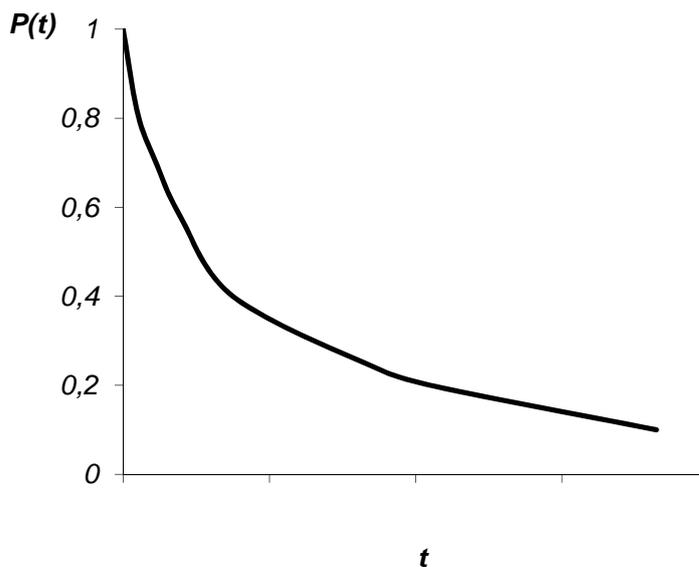


Рис. 1.1. Кривая убывающей функции $P(t)$

Для определения показателей безотказности изделия группируют на ремонтируемые и неремонтируемые. Вероятность безотказной работы неремонтируемых изделий определяют по формуле (1.1). Вероятность безотказной работы ремонтируемых изделий определяют через вероятность отказов Q_t :

$$P^1_{(t)} = 1 - Q_{(t)} = 1 - \frac{\sum n_1}{n_0}, \quad (1.2)$$

где n_1 – число наработок до отказов ремонтируемого изделия ко времени t_1 ; n_0 – число наработок до отказов за весь период наблюдения.

График изменения вероятности безотказной работы изделия от наработки показан на рис. 1.2.

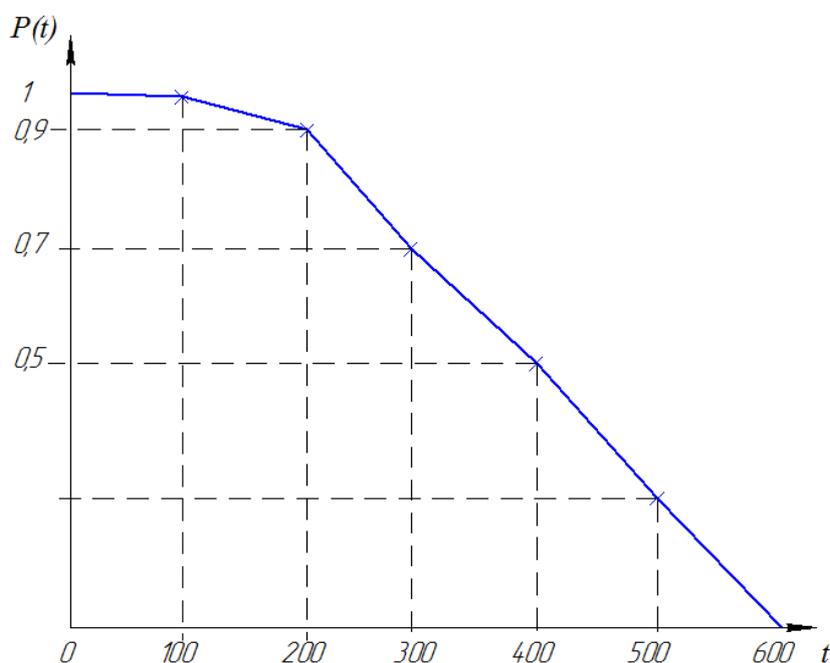


Рис. 1.2. График изменения вероятности безотказной работы от наработки

Под средней наработкой до отказа неремонтируемого изделия понимается математическое ожидание наработки изделий в партии до первого отказа, то есть среднее значение наработки изделий в партии до первого отказа.

В процессе работы N однотипных неремонтируемых изделий фиксируются случайные величины времени t_j работы каждого изделия до отказа.

Величина средней наработки до отказа T_0 определяется по выражению:

$$T_0 = \frac{\sum_{j=1}^N t_j}{N}. \quad (1.3)$$

Наработка на отказ T есть отношение наработки ремонтируемого изделия к математическому определению числа его отказов в течение этой наработки.

Для вычисления наработки на отказ ремонтируемого изделия выбирают фиксированный интервал его наработки $t_i \div t_j$, на базе которого определяют для совокупности всех изделий математическое ожидание числа отказов $M_0(n_{i,j})$:

$$T = \frac{t_i - t_j}{M_0(n_{i,j})}. \quad (1.4)$$

Математическое ожидание числа отказов в заданном интервале наработок N изделий

$$M_0(n_{i,j}) = \frac{\sum_{k=1}^N n_{(i,j)}}{N}, \quad (1.5)$$

где $n_{i,j}$ – число отказов k -го изделия в интервале наработок $t_i \div t_j$.

Выбор фиксированного интервала наработок зависит от цели исследования. Если берется период приработки в начале эксплуатации изделия, то целью является принятие необходимых мер для совершенствования конструкции и технологии изготовления изделия. Фиксированный интервал в период устойчивой работы изделия определяют с целью контроля нормируемой наработки на отказ изделия в его документации и оценки эффективности конструкции и качества изготовления изделия.

На момент контроля изделия, как правило, имеют разные наработки. Поэтому наработка на отказ определяется отношением суммарной наработки t_k за рассматриваемый календарный период всех подконтрольных изделий к суммарному числу их отказов n_k за тот же период:

$$T = \frac{\sum_{k=1}^N t_k}{\sum_{k=1}^N n_k}, \quad (1.6)$$

где N – общее количество однотипных изделий взятых под наблюдение.

Интенсивность отказов λ_t представляет собой вероятность отказа неремонтируемого изделия в единицу времени для рассматриваемого момента при условии, что отказ до этого момента не возник:

$$\lambda_t = \frac{N_{(t)} - N_{(t+\Delta t)}}{N_{(t)} \cdot \Delta t}, \quad (1.7)$$

где N_t – количество исправных изделий к моменту времени t ; $N_{t+\Delta t}$ – количество исправных элементов к моменту времени $t+\Delta t$; Δt – некоторый малый промежуток времени наблюдения; $N_t - N_{t+\Delta t}$ – это количество отказавших изделий за промежуток времени Δt .

Тогда интенсивность отказов можно определить по формуле

$$\lambda_t = \frac{\Delta n}{N_{(t)} \cdot \Delta t}. \quad (1.8)$$

График изменения интенсивности отказов от наработки изделия показан на рис. 1.3.

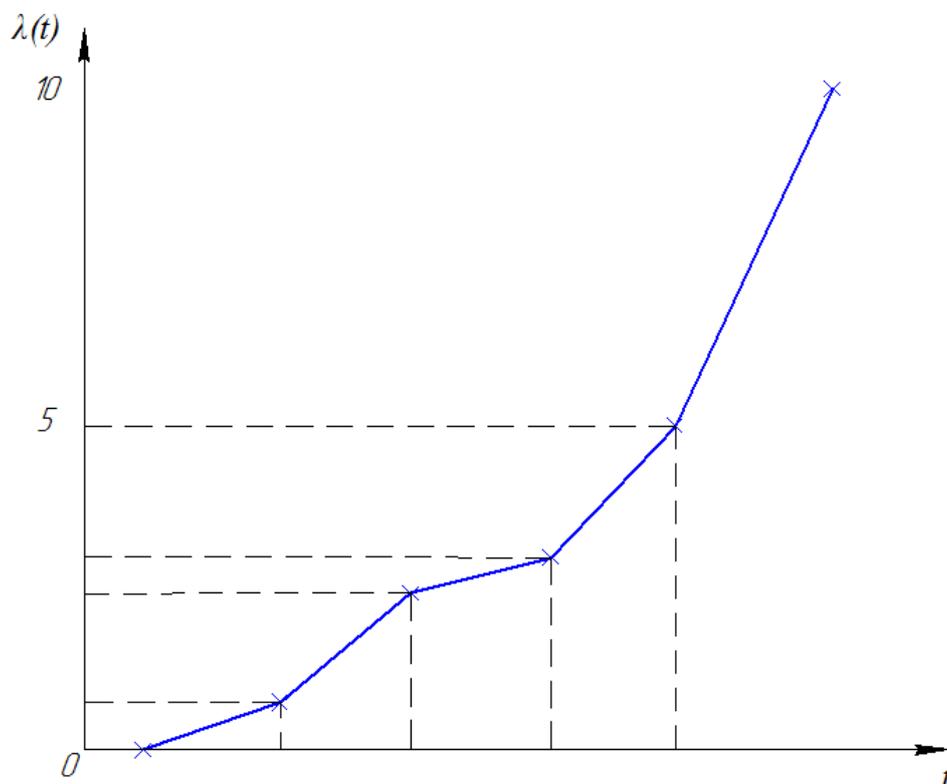


Рис. 1.3. График изменения интенсивности отказов от наработки

Параметр потока отказов ω_t – это плотность вероятности возникновения отказа ремонтируемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени N ;

$$\omega_{(t)} = \frac{\sum_{k=1}^N n_{k(t+\Delta t)} - \sum_{k=1}^N n_{k(t)}}{N \cdot \Delta t}, \quad (1.9)$$

где $n_{k(t+\Delta t)}$ – количество отказов k -го изделия к моменту времени $t+\Delta t$; $n_{k(t)}$ – количество отказов k -го изделия к моменту времени t ; N – количество однотипных машин, взятых под наблюдение; Δt – малый промежуток времени наблюдения.

Разность $\sum_{k=1}^N n_{k(t+\Delta t)} - \sum_{k=1}^N n_{k(t)}$ представляет собой количество Δn изделий за промежуток времени Δt .

Физический смысл параметра потока отказов для ремонтируемых изделий – это среднее число отказов в единицу времени для рассматриваемого периода. По своему содержанию понятия интенсивности отказов и параметра потока отказов различны. Числители выражений (2.7) и (2.9) имеют одинаковую структуру и представляют собой количество отказавших элементов ΔN и количество отказов Δn , а в знаменателе в выражении (2.7) $N_{(t)}$ является функцией времени и уменьшается, а в выражении (2.9) N – величина постоянная.

Показатели долговечности

Средний ресурс $T_{p, \text{cp}}$ – это математическое ожидание ресурса. Средний ресурс по статистической информации определяется следующим образом:

$$T_{p, \text{cp}} = \frac{\sum_{k=1}^N T_{pk}}{N}, \quad (1.10)$$

где T_{pk} – ресурс k -го изделия полной выборки, состоящий из N изделий.

Гамма-процентный ресурс T_{γ} – наработка, в течение которой изделие достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Значения γ -процентного ресурса можно определить с помощью кривых распределения ресурсов (рис. 1.4), взаимосвязь которых определяется выражением

$$P_{(p\gamma)} = \int P_{(T_p)} dT_p, \quad (1.11)$$

где $P_{p\gamma}$ – вероятность обеспечения ресурса $T_{p\gamma}$ при $\gamma = 100\%$; T_p – наработка до предельного состояния (ресурса); $P_{(T_p)}$ – вероятность ресурса.

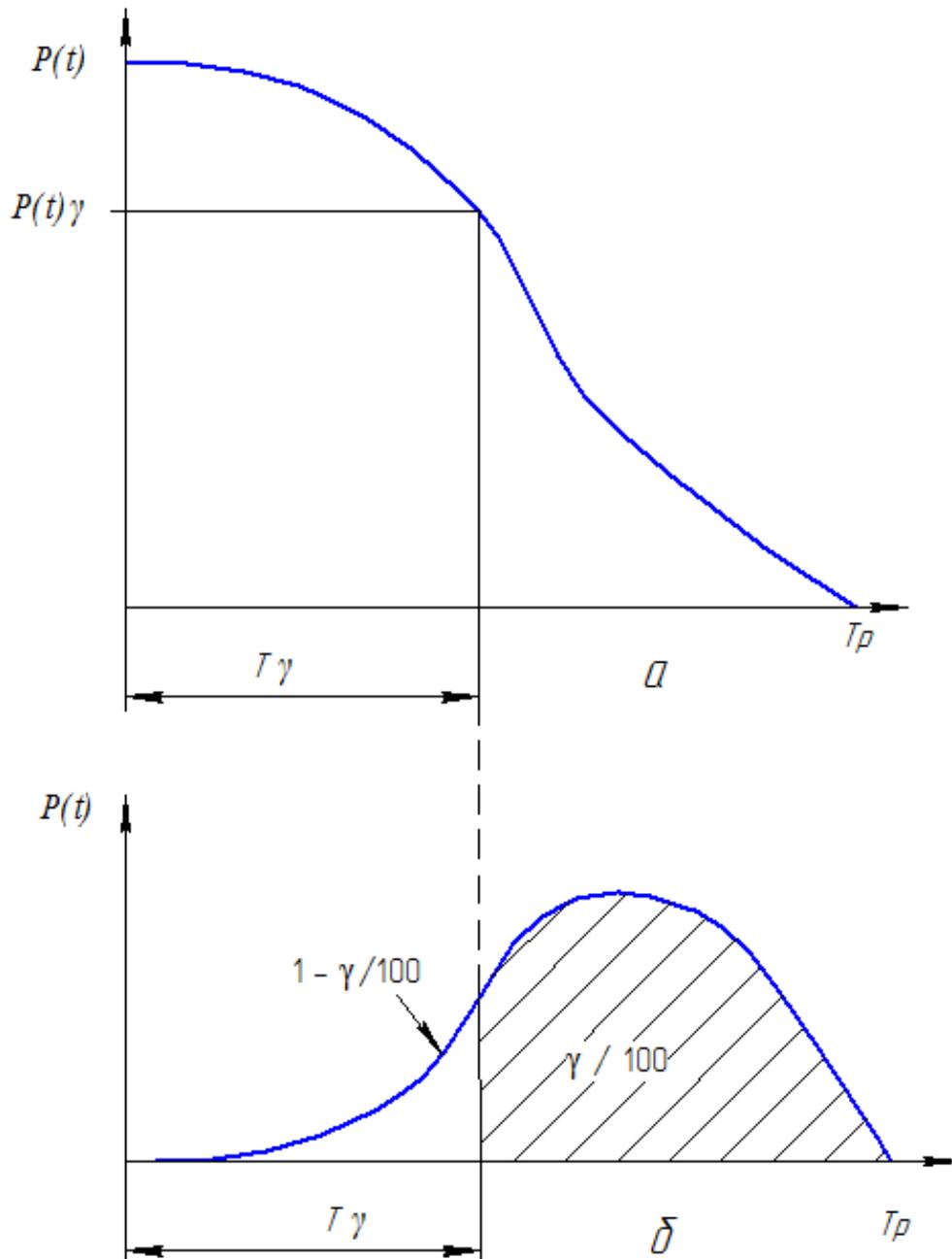


Рис. 1.4. Определение значений γ -процентного ресурса: a – по кривой убыли; δ – по кривой распределения ресурса

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы;
Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации изделия, в течение которой изделие достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Значения гамма-процентного срока службы $T_{сл \gamma}$ и среднего срока службы $T_{сл.ср}$ определяют по выражениям, аналогичным (1.11) и (1.10), зависящим от переменной $T_{сл}$.

Показатели ремонтпригодности

Среднее время восстановления – время вынужденного нерегламентированного простоя, вызванного отысканием и устранением отказа:

$$T_{в} = \frac{\sum_{k=1}^n T_k}{n}, \quad (1.12)$$

где $T_{в}$ – среднее время восстановления; T_k – время восстановления k -го отказа изделия; n – количество отказов, произошедших за время восстановления.

В общем случае T_k представляет собой сумму случайных величин, состоящих из четырех слагаемых:

$$T_k = T_{k1} + T_{k2} + T_{k3} + T_{k4}, \quad (1.13)$$

где T_{k1} – время обнаружения отказа; T_{k2} – время ремонта; T_{k3} – время опробования изделия после устранения отказа; T_{k4} – время ожидания ремонта.

Показатель $T_{в}$, определяемый по времени простоя на восстановление, характеризует приспособленность конструкции к обнаружению отказа, ликвидации и опробованию после ремонта, уровень организации ремонтной службы и обеспеченность запасными частями и материалами.

Интенсивность восстановления отказов $\mu_{(t)}$ – условная плотность вероятности восстановления изделия для рассматриваемого момента времени t при условии, что восстановление к этому моменту не закончено. Интенсивность восстановлений в единицу времени

$$\mu_{(t)} = \frac{\Delta n_{\tau}}{(N - n_{\tau_i}) \cdot \Delta \tau_i}, \quad (1.14)$$

где Δn_τ – количество изделий, время окончания ремонта которых происходит за время $\Delta \tau_i$; $n_{\tau i}$ – общее количество изделий, отремонтированных за время $0 \div \tau_i$; N – общее число изделий, находящихся под наблюдением.

Вероятность восстановления $\gamma_{(\tau)}$ – это вероятность события, заключающегося в том, что изделие будет восстановлено после отказа за время τ_3 в определенных условиях ремонта:

$$\gamma_{(\tau)} = P(\tau \leq \tau_3), \quad (1.15)$$

где τ – фактическое время восстановления.

Удельная суммарная оперативная трудоемкость восстановления (продолжительность, стоимость) технических обслуживаний (ремонтов) есть отношение суммы математических ожиданий трудоемкости всех видов технических обслуживаний и ремонтов к заданной наработке изделия.

Заданной наработкой при определении удельных оперативных затрат является средний ресурс до первого капитального ремонта изделия ($T_{p.cplk}$). Тогда значения удельной суммарной оперативной трудоемкости (продолжительности, стоимости) технических обслуживаний и ремонтов будут равны соответственно:

$$S_{TO(p)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{TO(p)}} n_{TO(p)i} \cdot \tau_{TO(p)i}}{T_{p.cplk}}; \quad (1.16)$$

$$\tau_{TO(p)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{TO(p)}} n_{TO(p)i} \cdot \tau_{TO(p)i}}{T_{p.cplk}}; \quad (1.17)$$

$$C_{TO(p)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{TO(p)}} n_{TO(p)i} \cdot C_{TO(p)i}}{T_{p.cplk}}, \quad (1.18)$$

где $n_{TO(p)i}$ – число технических обслуживаний (ремонтов) изделий i -го вида за установленный период эксплуатации; $N_{TO(p)}$ – число видов технических обслуживаний в ремонтном цикле; $\tau_{TO(p)}$ – средняя оперативная продолжительность ТО; $C_{TO(p)i}$ – средняя оперативная стои-

мость ТО; $S_{\text{ТО(р)}i}$ – средняя оперативная трудоемкость технического обслуживания (ремонта) i -го вида:

$$S_{\text{ТО(р)}i} = \frac{1}{n_{\text{ТО(р)}i}} \cdot \sum_{j=1}^{n_{\text{ТО(р)}i}} \cdot \sum_{f=1}^{a_{\text{ТО(р)}i}} \cdot \sum_{l=1}^k t_{f,l,i}^{(j)}; \quad (1.19)$$

где $a_{\text{ТО(р)}i}$ – число исполнителей технического обслуживания (ремонта) изделий i -го вида; k – число операций при выполнении технического обслуживания (ремонта) i -го вида; $t_{f,l,i}^{(j)}$ – оперативное время работы f -го исполнителя на l -й операции в j -м по порядку выполнения техническом обслуживании (ремонте) i -го вида.

Средняя оперативная продолжительность технического обслуживания (ремонта) i -го вида

$$\tau_{\text{ТО(р)}i} = \frac{S_{\text{ТО(р)}i}}{a_{\text{ТО(р)}i}}. \quad (1.20)$$

Средняя оперативная стоимость технического обслуживания (ремонта) i -го вида

$$C_{\text{ТО(р)}i} = \frac{1}{n_{\text{ТО(р)}i}} \cdot \sum_{j=1}^{n_{\text{ТО(р)}i}} \cdot \sum_{f=1}^{a_{\text{ТО(р)}i}} \cdot \sum_{l=1}^k C_{f,l,i}^{(j)}, \quad (1.21)$$

где $C_{f,l,i}^{(j)}$ – стоимость работы за оперативное время f -го исполнителя на l -й операции в j -м по порядку выполнения техническом обслуживании (ремонте) i -го вида.

Объединенная удельная оперативная трудоемкость (продолжительность, стоимость) технических обслуживаний и ремонтов равна сумме удельных оперативных трудоемкостей (продолжительность, стоимость) технических обслуживаний и ремонтов всех видов за определенную наработку.

Все показатели ремонтпригодности оцениваются затратами труда, времени и средств, необходимыми для выполнения слесарных операций при ремонте, монтаже, разборке, сборке сборочных единиц изделия, а также для выполнения сопутствующих подготовительных и заключительных операций. Эти затраты определяются с учетом заданного набора инструментов и приспособлений, условий выполнения работ и квалификации операторов исполнителей.

Показатели сохраняемости

Показатели сохраняемости оценивают способность изделия быть работоспособным в условиях хранения, транспортирования, оставая без изменения при этом свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости, вычисляется по формуле, аналогичной (1.10).

Гамма-процентный срок сохраняемости – календарная продолжительность срока хранения или транспортирования изделия, в течение и после которой показатели свойств долговечности, безотказности и ремонтпригодности не выйдут за установленные пределы с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный срок сохраняемости определяется выражением

$$P(t_{\text{сх}\gamma}) = \int_{t_{\text{сх}\gamma}}^{\infty} P(t_{\text{сх}}) dt_{\text{сх}} = \frac{\gamma}{100}, \quad (1.22)$$

где $t_{\text{сх}\gamma}$ – наработка, в течение которой изделие сохранится с вероятностью γ .

Назначенный срок хранения – календарная продолжительность хранения в заданных условиях, по истечении которого применение изделия по назначению не допускается независимо от его технического состояния.

1.6. Комплексные показатели надежности

Комплексные показатели надежности – это количественная оценка, характеризующая несколько свойств надежности.

Коэффициент готовности – вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по назначению не предусматривается. Коэффициент готовности оценивает надежность изделия в определенном интервале работы изделия и является средней величиной в этом интервале.

Статистический коэффициент готовности k_T определяется по формуле

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{n=1}^N t_n}{\sum_{n=1}^N t_n + \sum_{n=1}^N \tau_n}, \quad (1.23)$$

где t_n – наработка n -го изделия в заданном интервале эксплуатации; τ_n – оперативная продолжительность восстановления n -го отказа; N – число изделий, взятых под наблюдение.

Если в определенном интервале определены значения наработки на отказ и средняя оперативная продолжительность восстановления, то коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + \tau_{\text{в}}}. \quad (1.24)$$

Для изделий, подлежащих капитальному ремонту, коэффициент готовности определяют в период эксплуатации до капитального ремонта:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{р.сплк}}}{T_{\text{р.сплк}} + \tau_{\text{в}}^{\Sigma}}, \quad (1.25)$$

где $\tau_{\text{в}}^{\Sigma}$ – средняя суммарная оперативная продолжительность восстановления работоспособности изделия после отказов за период до первого капитального ремонта, определяемая по формуле (1.17).

Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания наработки изделия за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий наработки, продолжительности технического обслуживания и всех видов ремонта за тот же период эксплуатации. Обычно коэффициент технического использования определяют за последний год эксплуатации или за период до первого капитального ремонта:

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{T_{\text{р.сплк}}}{T_{\text{р.сплк}} + \tau_{\text{ТО}}^{\Sigma} + \tau_{\text{р}}^{\Sigma} + \tau_{\text{в}}^{\Sigma}}, \quad (1.26)$$

где $T_{\text{р.сплк}}$ – суммарное время безотказной работы; $\tau_{\text{ТО}}^{\Sigma}$ – суммарное время технических обслуживаний; $\tau_{\text{р}}^{\Sigma}$ – суммарное время плановых ремонтов; $\tau_{\text{в}}^{\Sigma}$ – суммарное время аварийных ремонтов.

Представляя выражения (1.25) и (1.26) через удельные суммарные продолжительности технических обслуживаний и ремонтов, и поделив указанные выражения на величину среднего ресурса изделия, получаем

$$K_r = \frac{1}{1 + \tau_b}; \quad (1.27)$$

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{1}{1 + \tau_{\text{ТО}} + \tau_p + \tau_b}. \quad (1.28)$$

А удельная суммарная продолжительность восстановления отказов изделия

$$\tau_b = \frac{1}{K_r} - 1. \quad (1.29)$$

Удельная объединенная оперативная продолжительность технических обслуживаний и ремонтов должна быть не более:

$$\tau_{\text{об}} \leq \frac{1}{K_{\text{ТИ}}} - 1. \quad (1.30)$$

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых эксплуатация изделия по назначению не предусматривается, и начиная с этого момента изделие будет работать безотказно в течение заданного интервала времени. Численное его значение определяется выражением

$$K_{\text{ог}} = K_r \cdot P(t_0; t_1), \quad (1.31)$$

где t_0 – момент времени, с которого возникает необходимость применения изделия по назначению; t_1 – момент времени, когда применение изделия по назначению прекращается; $P(t_0; t_1)$ – вероятность безотказности работы изделия в интервале времени $(t_0; t_1)$.

1.7. Определение показателей надежности. Примеры решения задач

Пример 1

Определить показатели безотказности шарошечного долота бурового станка ЗСБШ–60–200 и построить графики этих показателей в зависимости от наработки станка при следующих исходных данных:

- количество долот, взятых под наблюдение $N_0 = 30$;
- количество отказавших долот $N_1 = 30$;
- наработки долот, в погонных метрах скважины T_{pi} :
101, 171, 220, 229, 243, 245, 272, 291, 299, 312, 331, 343, 366, 371, 384, 401, 417, 421, 437, 448, 449, 512, 466, 473, 505, 538, 541, 555, 587, 591.

Решение

Показатели безотказности шарошечных долот (неремонтируемых изделий):

- 1) вероятность безотказной работы $P_{(t)}$;
$$P_t = \frac{N_t}{N_0};$$
- 2) средняя наработка до отказа T_0 ;
$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^N t_{pi}}{\sum_{i=1}^N n_i};$$
- 3) интенсивность отказов $\lambda_{(t)}$;
$$\lambda_{(t)} = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N_{(t)}}.$$

Весь диапазон полученных значений наработки случайных величин t_{pi} разбивается на интервалы. Количество интервалов берется от 5 до 20. Большее число интервалов применяется, когда объем статистического материала превышает 200 значений. Примерная величина интервала определяется по формуле

$$\Delta t = \frac{t_{p \max} - t_{p \min}}{1 + 3,3 \lg n},$$

где $t_{p \max}$ – максимальная величина наработки в выборке; $t_{p \min}$ – минимальная величина наработки в выборке; n – количество значений случайной величины в выборке.

Для нашего примера $\Delta t = \frac{591 - 101}{1 + 3,3 \cdot \lg 30} \approx 100$ пог. м.

Если при равных интервалах Δt количество значений случайной величины в интервале окажется меньше 3, интервал увеличивается вдвое.

Таблица 1.1

T_{pi}	Δt_i	Δn_i	$N_{(t)}$	$N_{(t+\Delta t)}$	$P_{(t)}$	$\lambda_{(t)}$	T_o
100	0–100	0	30	30	1	0	
200	100–200	2	30	28	0,93	0,00067	341,8
300	200–300	7	28	21	0,70	0,0025	
400	300–400	6	21	15	0,50	0,0029	
500	400–500	8	15	7	0,23	0,0053	
600	500–600	7	7	0	0	0,0100	

Для каждого интервала Δt подсчитывается Δn_i : количество значений случайных величин, попавших в i -й интервал; $N_{(t)}$ – количество исправных изделий ко времени t ; $N_{(t+\Delta t)}$ – количество исправных изделий ко времени $t+\Delta t$;

Данные заносятся в табл. 1.1.

Значения вероятности безотказной работы и интенсивности отказов в зависимости от наработки представляем в графическом виде. Полученные значения интенсивности проставляются на графике посреди интервала.

Пример 2

Определить параметр потока отказов трех однотипных машин в межремонтный период и между 5 и 15 сутками наблюдения. Межремонтный период равен 30 суткам.

Наработки между отказами, сут.:

– первая машина – 3, 6, 8, 4, 2, 5;

– вторая машина – 1, 2, 5, 3, 4, 2, 4, 3, 3, 2;

– третья машина – 4, 6, 7, 4, 8;

Решение

1. Параметр потока отказов в межремонтный период.

Начальный момент времени $t = 0$.

Интервал $\Delta t = 30$ сут.

Параметр потока отказов определяется по формуле

$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^N n_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N n_i(t)}{N \Delta t},$$

В этом выражении число отказов в момент $t = 0$ для всех трех машин равно 0, т. е. $\sum_{i=1}^N n_i(t) = 0$.

Число отказов до наработки $t + \Delta t = 30$ сут. составляет:

- для первой машины $n_1(30) = 6$;
- для второй машины $n_2(30) = 10$;
- для третьей машины $n_3(30) = 5$.

Параметр потока отказов:

$$\omega(t) = \frac{(6 + 10 + 5) - 0}{3 \cdot 30} = 0,233 \text{ 1/сут.}$$

2. Параметр потока отказов в период между 5 и 15 сутками наблюдения.

Начальный момент времени $t = 5$ сут.

Интервал $\Delta t = 10$ сут.

Число отказов до наработки $t = 5$ сут. равно:

- для первой машины $n_1(5) = 1$;
- для второй машины $n_2(5) = 2$;
- для третьей машины $n_3(5) = 1$.

Число отказов до наработки $t = 15$ сут. соответственно равно:

- для первой машины $n_1(15) = 2$;
- для второй машины $n_2(15) = 5$;
- для третьей машины $n_3(15) = 2$.

Параметр потока отказов в интервале времени между 5 и 15 сутками ($\Delta t = 10$ сут.) равен:

$$\omega(t) = \frac{(2 + 5 + 2) - (1 + 2 + 1)}{3 \times 10} = 0,167 \text{ 1/сут.}$$

Следовательно, машины более надежно работали в интервале (5 – 15) суток.

Если имеются кривые вероятности $F(x)$ и $P(x)$ можно решать различные практические вопросы. Например, если требуется, чтобы вероятность сохранения работоспособности была не ниже $[P_{(x)}]$, то воспользовавшись графиком можно определить, что наработка при этом не должна превышать X_1 .

Для подсчета вероятности того, что случайная величина, распределенная по нормальному закону, находится в тех или иных пределах, пользуются интегралом:

$$\Phi_{(t)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

где $t = \frac{x - mx}{\sigma}$; $dt = \frac{dx}{\sigma}$.

Вероятность того, что случайная величина при испытаниях примет значение в пределах от x_1 до x_2 :

$$P(x_1 < x < x_2) = \Phi_{(t_2)} - \Phi_{(t_1)} = \Phi\left(\frac{x_2 - mx}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - mx}{\sigma}\right).$$

Табличный интеграл $\Phi_{(t)}$ соответствует площади под кривой, заключенной между осью симметрии и ординатой, соответствующей t .

Например, для $x = 3\sigma$ и $t = 3$ из таблиц значений интеграла вероятностей $\Phi(t)$ находим, что $\Phi(3) = 0,49865$, т. е. $2\Phi(3) = 0,997$. Это подтверждает, что с вероятностью 0,997 случайная величина лежит в пределах $\pm 3\sigma$.

Экспоненциальное распределение является распределением времени между независимыми событиями, появляющимися с постоянной интенсивностью. В теории надежности это распределение описывает появление внезапных, не предсказуемых отказов. Применение экспоненциального закона дает возможность получить результаты, пригодные для оценки надежности вновь разрабатываемых изделий.

Пример 3

Определить коэффициенты готовности и технического использования экскаватора ЭКГ – 5А в течение календарного года по следующим исходным данным: работа экскаватора двухсменная в рабочие дни, продолжительность смены – 8 ч. Время простоев от аварийных ремонтов в году – 15 смен.

Решение

Задаемся режимом работы предприятия: работа двухсменная при пятидневной рабочей неделе кроме выходных и праздничных дней, а также дней планово-предупредительных ремонтов и обслуживаний.

Коэффициенты определяются по формулам

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{j=1}^m \tau_j};$$

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{j=1}^m \tau_j + \sum_{k=1}^r \tau_{\text{ТОиР}}},$$

где $\sum_{i=1}^n t_{pi}$ – суммарное время работы экскаватора в течение года:

$$\sum_{i=1}^n t_{pi} = (T_{\text{год}} \frac{16}{24} - \sum_{i=1}^m \tau_i + \sum_{j=1}^k T_n - \sum_{k=1}^c T - \sum_{k=1}^r \tau_{\text{ТОиР}}) \cdot K_{\text{и}},$$

где $T_{\text{год}}$ – годовой фонд времени в часах (8760); m – количество аварийных простоев в году; $\sum_{i=1}^m \tau_i$ – время аварийных простоев в году в

часах (120); $\sum_{j=1}^k T_n$ – время праздничных простоев в году в часах (9·16);

k – количество простоев в праздничные дни; $\sum_{k=1}^c T$ – время простоев в выходные дни в году в часах (8760·(2/7)·(16/24)); c – количество простоев в выходные дни в году; $\sum_{k=1}^r T_{\text{ТОиР}}$ – время простоев в году в пла-

новых ремонтах и техобслуживании, в часах (согласно стандартным значениям ППР = 552 ч); r – количество простоев в плановых ремонтах и в ТО; $K_{\text{и}}$ – коэффициент использования экскаватора в течение смены, $K_{\text{и}} = 0,9$.

$$\text{Тогда } \sum_{i=1}^n t_{pi} = (5840 - 120 - 144 - 1668 - 552) \cdot 0,9 = 3020(\text{ч});$$

$$K_r = \frac{3020}{3020 + 120} = 0,962; \quad K_{\text{ти}} = \frac{3020}{3020 + 120 + 552} = 0,818.$$

2. ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Основные понятия теории вероятности

Расчет показателей надежности основан на теории вероятностей и математической статистике. Теория вероятности изучает закономерности случайных величин. А причины возникновения отказов горных машин носят случайный характер.

Эксперимент – это мыслимый или реально поставленный опыт, результатом которого является *событие*. Эксперимент, в котором невозможно однозначно предугадать конкретный исход, называется вероятностным экспериментом.

События делятся на три группы:

- достоверные события, которые обязательно произойдут, если будут выполнены конкретные условия;
- невозможные события, которые в определенных известных условиях произойти не смогут;
- случайные (вероятностные) события, которые могут произойти или не произойдут в случайный отрезок времени.

Вероятность события $P_{(A)}$ определяется отношением числа исходов, благоприятствующих появлению события A к общему числу элементарных исходов в рассматриваемом эксперименте:

$$P_{(A)} = \frac{m}{n}, \quad (2.1)$$

где m – число исходных экспериментов, благоприятствующих появлению события A ; n – общее число экспериментов.

Численной мерой степени возможности появления события A является его вероятность $P_{(A)}$. Вероятность невозможного и достоверного событий приняты соответственно 0 и 1. Вероятность случайного события могут иметь значения в пределах $0 \leq P_{(A)} \leq 1$.

Если в эксперименте возможны только два события, одно из которых обязательно происходит, то такие два события называют про-

твояположными. Сумма вероятностей противоположных событий равна единице.

Примером двух противоположных событий являются состояние изделия в работоспособном состоянии или состоянии отказа. Какое–либо другое состояние с точки зрения работоспособности невозможно.

Сумма вероятности безотказной работы и вероятности отказа равна единице:

$$P_{(A)} + Q_{(A)} = 1. \quad (2.2)$$

Для событий, не сводящихся к схеме случаев равновозможных, т. е. когда в результате проведения n -опытов заранее невозможно определить, сколько раз произойдет событие A , существует понятие частоты события A .

Частота события – это статистическая вероятность, она обозначается P'_A :

$$P'_A = \frac{m}{n}, \quad (2.3)$$

где m – число появления события A .

При увеличении числа отказов частота события $P'_{(A)}$ сходится по вероятности с математической вероятностью $P_{(A)}$.

Наряду с понятием случайного события имеется понятие случайной величины, которая в результате опыта может иметь случайное значение. Случайные величины могут быть дискретными и непрерывными.

Примером дискретной величины может быть количество отказов горной машины, непрерывной – время безотказной работы, восстановления отказов и т. д.

2.2. Теоремы, применяемые в теории надежности

Теорема сложения вероятностей несовместных событий. Несовместные события – это такие, которые в одном опыте не могут произойти совместно.

Вероятность появления одного из двух несовместных событий равна сумме вероятности этих событий:

$$P_{(A+B)} = P_{(A)} + P_{(B)}. \quad (2.4)$$

Вероятность появления одного из нескольких попарно несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P_{(A_1+A_2+\dots+A_n)} = P_{(A_1)} + P_{(A_2)} + \dots + P_{(A_n)} = \sum_{i=1}^n P_{(A_i)}. \quad (2.5)$$

Теорема сложения вероятностей совместных событий. Вероятность появления хотя бы одного из двух совместных событий равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного появления:

$$P_{(A+B)} = P_{(A)} + P_{(B)} - P_{(AB)}. \quad (2.6)$$

Теорема обобщается на любое число совместных событий.
Для трех событий

$$P_{(A+B+C)} = P_{(A)} + P_{(B)} + P_{(C)} - P_{(AB)} - P_{(AC)} - P_{(BC)} + P_{(ABC)}. \quad (2.7)$$

Теорема умножения вероятностей независимых событий. Вероятность совместного появления двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P_{(AB)} = P_{(A)} \cdot P_{(B)}. \quad (2.8)$$

Для нескольких событий

$$P_{(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n)} = P_{(A_1)} \cdot P_{(A_2)} \cdot \dots \cdot P_{(A_n)} = \prod_{i=1}^n P_{(A_i)}. \quad (2.9)$$

Теорема умножения вероятностей зависимых событий. Вероятность совместного появления двух зависимых событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого:

$$P_{(AB)} = P_{(A)} \cdot P_{A(B)}; \quad (2.10)$$

$$P_{(AB)} = P_{(B)} \cdot P_{B(A)}. \quad (2.11)$$

Вероятность появления хотя бы одного события A , состоящего из событий $A_1 A_2 \dots A_n$, независимых в совокупности, равна разности между единицей и произведением вероятностей противоположных событий:

$$P_{(A)} = 1 - q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n, \quad (2.12)$$

где q_1, q_2, \dots, q_n – вероятность отказа.

2.3. Понятия законов распределения и числовых характеристик случайных величин

В результате опытов случайная величина x может получить конкретные значения $x_1, x_2 \dots x_n$. Каждое значение возможно, но не достоверно, и величина x может принять эти значения с некоторой вероятностью $P_1; P_2; P_3 \dots P_n$. Если несовместные события образуют полную группу, то

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1. \quad (2.13)$$

Соотношение, устанавливающие связь между возможными значениями случайной величины и их вероятностями, называется *законом распределения случайной величины*. Наиболее простой формой задания закона распределения дискретных случайных величин является ряд распределения.

Он может быть представлен в виде табл. 2.1.

Таблица 2.1

X_i	X_1	X_2	X_3	X_{n-1}	X_n
P_i	P_1	P_2	P_3	P_{n-1}	P_n

Для наглядности дискретное распределение можно представить в виде многоугольника распределения (рис. 2.1, *a*). Полной и универсальной формой задания закона распределения случайной величины является функция распределения, называемая интегральной функцией распределения или интегральным законом распределения случайной величины.

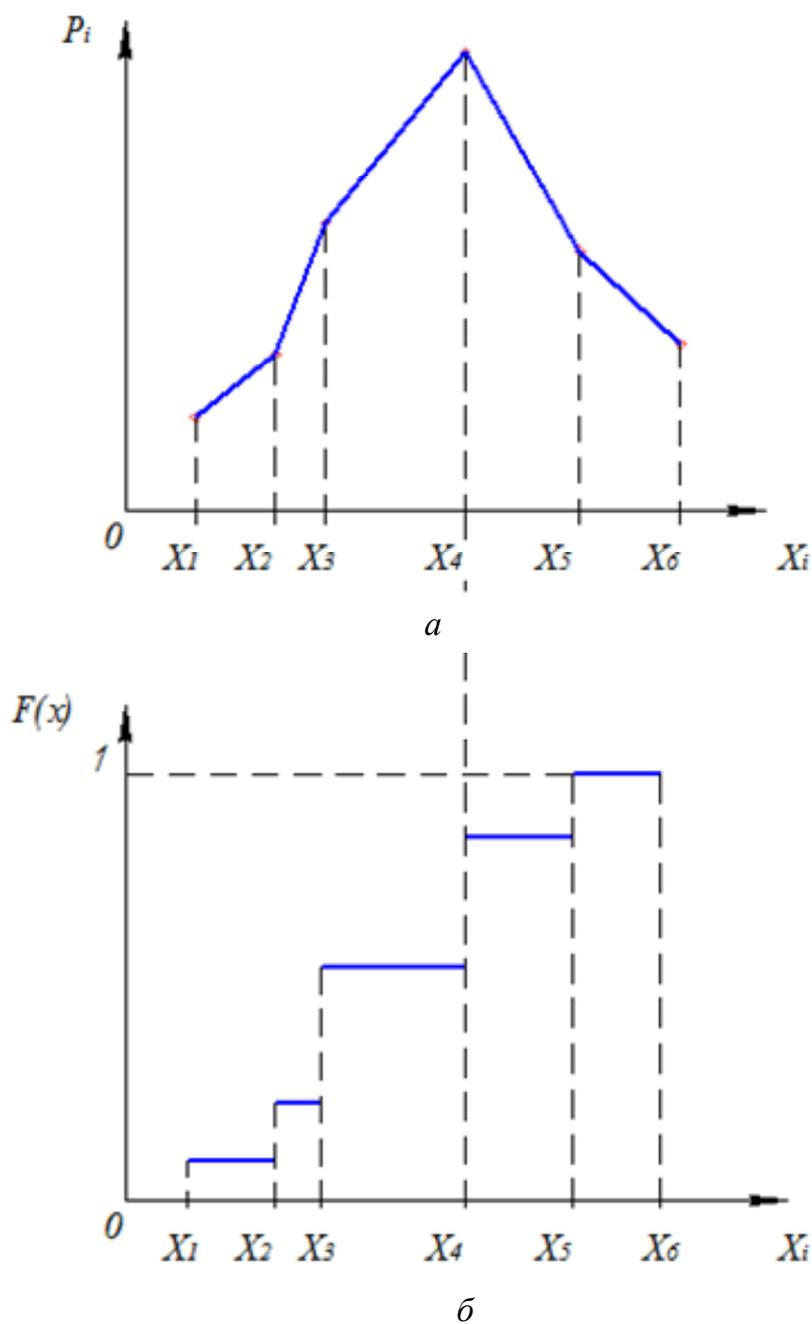


Рис. 2.1. Дискретное распределение: *а* – многоугольник распределения; *б* – график функции распределения (дискретная случайная величина)

Для дискретных случайных величин функция распределения имеет вид

$$F_{(x)} = \sum_{x_i < x} P(x = x_i), \quad (2.14)$$

где неравенство $x_i < x$ под знаком суммы указывает, что суммирование распространяется на значения x_i , которое меньше x .

График функции распределения случайной величины имеет скачкообразную форму (рис 2.1, б), причем величина скачка равна вероятности этого значения. Сумма всех возможных значений скачков функции $F_{(x)}$ равна единице.

Для непрерывной случайной величины функция имеет вид

$$F_{(x)} = P(x < x_i), \quad (2.15)$$

где x_i – некоторая текущая переменная.

Функция распределения является неубывающей функцией своего аргумента:

$$F_{(x_2)} > F_{(x_1)} \text{ при } x_2 > x_1$$

При минус бесконечности функция распределения равна нулю: $F(-\infty) = 0$.

При плюс бесконечности функция распределения равна единице: $F(+\infty) = 1$.

График функции непрерывной случайной величины представлен на рис. 2.2.

При решении практических задач со случайными величинами необходимо вычислить вероятность того, что случайная величина примет значение, лежащее в интервале от α до β . Если условиться, что α включать в участок интервала, а β не включать, то вероятность попадания величины x в участок $(\alpha \div \beta)$, можно выразить как

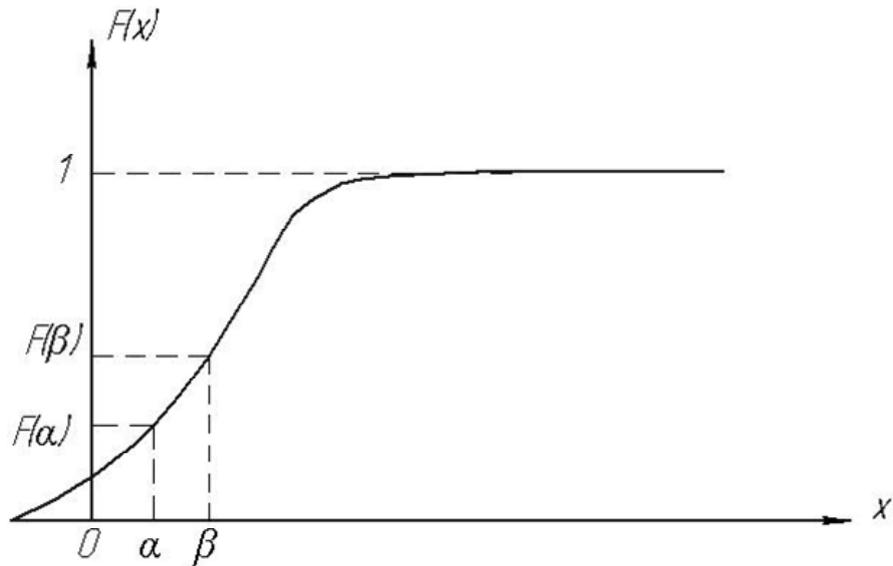
$$P(\alpha \leq x < \beta).$$

Она будет равна $F_{(\beta)} - F_{(\alpha)}$, где $F_{(\alpha)}$ и $F_{(\beta)}$ – функции распределения при $x = \alpha$ и $x = \beta$.

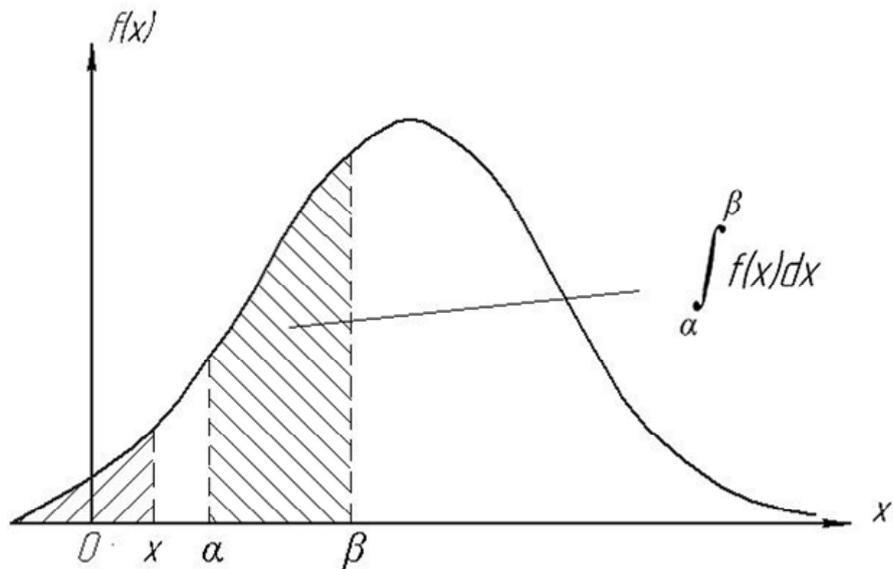
На рис. 2.2 показано графическое представление вероятности события попадания в интервал.

Для характеристики непрерывных случайных величин наряду с функцией распределения используется понятие плотности вероятности распределения $f_{(x)}$, называемой *дифференциальным законом распределения*. Она определяет неравномерность распределения случайной величины и выражение ее, т. е. производная от $F'_{(x)}$, имеет следующий вид:

$$f(x) = F'_{(x)}. \quad (2.16)$$



a



б

Рис 2.2. График функции непрерывной случайной величины:
a – график функции распределения;
б – кривая плотности распределения (непрерывная случайная величина)

График плотности вероятности распределения является неотрицательной функцией $f_{(x)} \geq 0$, так как функция $F_{(x)}$ является неубывающей.

Интеграл в бесконечных пределах от плотности вероятности равен единице:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_{(x)} dx = 1. \quad (2.17)$$

Функция распределения может быть выражена через плотность вероятности:

$$F_{(x)} = \int_{-\infty}^x f_{(x)} dx. \quad (2.18)$$

Для вероятностного описания случайных величин широко используются числовые характеристики, которые в сжатой форме выражают наиболее существенные особенности распределения случайной величины. Характеристиками положения случайной величины являются математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратичное отклонение.

Математическим ожиданием m_x случайной величины, или ее средним значением, называется сумма произведений всех возможных значений случайной величины на вероятность этих значений.

Для дискретных случайных величин

$$m_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (2.19)$$

Для непрерывных случайных величин

$$m_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx. \quad (2.20)$$

Из всех моментов для характеристики случайных величин чаще всего применяют математическое ожидание m_x и дисперсию D_x случайной величины.

Для дискретных случайных величин

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \cdot p_i. \quad (2.21)$$

Для непрерывных случайных величин

$$D_x = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 \cdot f(x) dx. \quad (2.22)$$

Дисперсия является характеристикой рассеивания, разбросанности ее значений около математического ожидания.

Наряду с дисперсией пользуются среднеквадратичным отклонением случайной величины:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (2.23)$$

Для дискретных случайных величин

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \cdot p_i. \quad (2.24)$$

Для непрерывных случайных величин

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - m_x)^2 f_{(x)} dx. \quad (2.25)$$

Коэффициентом вариации (изменчивости) случайной величины называют отношение среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию:

$$V_x = \frac{\sigma_x}{m_x}. \quad (2.26)$$

При изучении процессов, зависящих от случайных величин (x и y) возможны различные степени зависимости одной величины от другой.

Случайную величину x называют независимой от случайной величины y , когда закон распределения величины x не зависит от изменения величины y . Если закон распределения величины x определяется плотностью распределения $f_{(x)}$, а закон распределения величины y определяется плотностью распределения $f_{2(y)}$, то при условии независимости x и y плотность распределения совокупности независимых случайных величин равна:

$$f(x, y) = f_1(x) \cdot f_2(y), \quad (2.27)$$

где $f(x, y) = f_1(x) \cdot f(y/x)$ или $f(x, y) = f_2(y) \cdot f(x/y)$.

Мера зависимости между случайными величинами характеризуется коэффициентом корреляции $K_{x,y}$:

$$K_{x,y} = \int \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)(y - m_y) f(x, y) dx dy, \quad (2.28)$$

где m_x и m_y – математические ожидания величин x и y .

2.4. Законы распределения случайных величин

При анализе надежности (времени безотказной работы, восстановления и т. п.) используются различные непрерывные и дискретные распределения: нормальное, экспоненциальное, логарифмически-нормальное, гамма-распределение, распределение Вейбулла, кси-квадрат распределение, равномерное и др.[5]. Разные условия связи в изделиях, физической сущности отказов и особенности восстановления приводят к различным распределениям.

Нормальное распределение является основным распределением математической статистики. В теории надежности нормальное распределение принимают как распределение наработки отказов элементов изделий вследствие износа и старения, когда коэффициент вариации $V_x = \frac{\sigma_x}{m_x}$ не превышает $0,3 \div 0,4$.

Кривые нормального распределения приведены на графиках (рис. 2.3.)

Плотность распределения описывается уравнением

$$f_x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2.29)$$

где m_x – математическое ожидание величин x ; $\sigma^2 = D_{(x)}$ – дисперсия случайной величины x .

Функция распределения

$$F_{(x)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma^2}\right] dx. \quad (2.30)$$

Вероятность безотказной работы можно определить, учитывая свойство, что сумма вероятности безотказной работы и вероятности отказа равны единице. Если имеются кривые вероятности $F_{(x)}$ и $P_{(x)}$, можно решать различные практические вопросы.

Например, если требуется, чтобы вероятность сохранения работоспособности была не ниже $[P_{(x)}]$, то воспользовавшись графиком можно определить, что наработка при этом не должна превышать x_1 .

Для подсчета вероятности того, что случайная величина, распределенная по нормальному закону, находится в тех или иных пределах, пользуются табулированным интегралом:

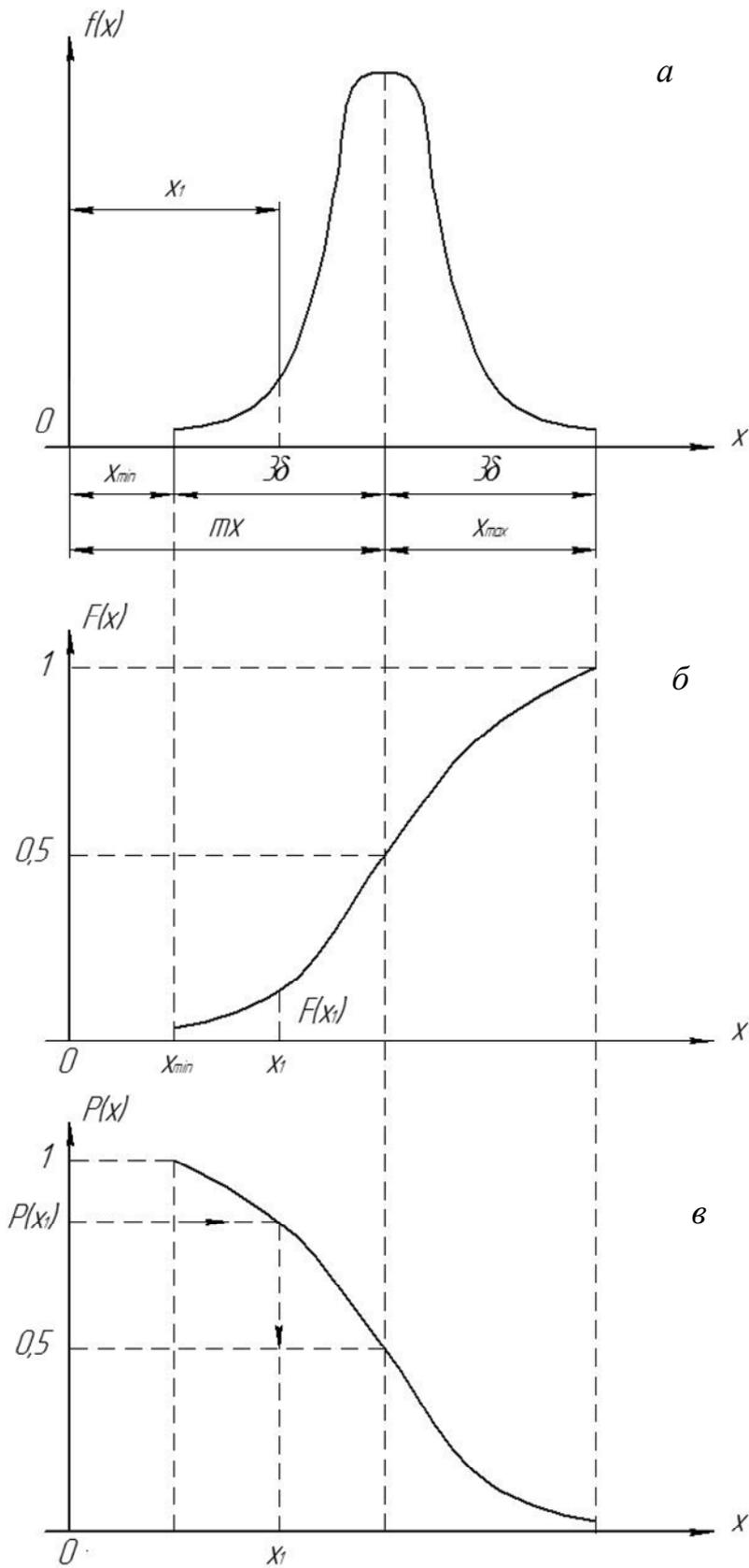


Рис 2.3. Кривые нормального распределения:
a – плотность вероятности распределения; *б* – функция распределения;
в – функция надежности (вероятности безотказной работы)

$$\Phi_{(t)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2.31)$$

где $t = \frac{x - m_x}{\sigma}$; $dt = \frac{dx}{\sigma}$.

Вероятность того, что случайная величина при испытаниях примет значения в пределах от x_1 до x_2 равна:

$$P(x_1 < x < x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{x_2 - m_x}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - m_x}{\sigma}\right). \quad (2.32)$$

Табличный интеграл $\Phi(t)$ соответствует площади под кривой, заключенной между осью симметрии и ординатой, соответствующей t .

Например, для $x = 3\sigma$ и $t = 3$ из таблиц значений интеграла вероятностей $\Phi(t)$ находим, что $\Phi(3) = 0,49865$, т. е. $2\Phi(3) = 0,997$. Это подтверждает, что с вероятностью 0,997 случайная величина лежит в пределах $\pm 3\sigma$.

Экспоненциальное распределение – это распределение времени между независимыми событиями, появляющимися с постоянной интенсивностью. В теории надежности это распределение описывает появление внезапных, непредсказуемых отказов. Применение экспоненциального закона дает возможность получить результаты, пригодные для оценки надежности вновь разрабатываемых изделий.

При рассмотрении внезапных отказов изделия исходят из того, что каждый такой отказ является следствием случайного неблагоприятного сочетания внешних и внутренних факторов и может не зависеть от состояния изделия. Экспоненциальное распределение принимают для сложных изделий и систем, прошедших период приработки и времени безотказной работы изделий с большим числом последовательно соединенных элементов, если каждый из них в отдельности не оказывает большого влияния на отказ изделия.

Экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Вейбулла и гамма-распределения.

Плотность распределения

$$f_{(x)} = \lambda \cdot e^{-\lambda x} = \lambda_{\text{exp}}(-\lambda_x), \quad (2.33)$$

где λ – параметр распределения,

$$\lambda = \frac{1}{m_{(x)}}. \quad (2.34)$$

Функция распределения

$$F_{(x)} = 1 - e^{-\lambda x} \text{ при } x \geq 0; \quad \text{при } x < 0 \quad F_{(x)} = 0. \quad (2.35)$$

Кривые плотности и функции распределения приведены на рис. 2.4.

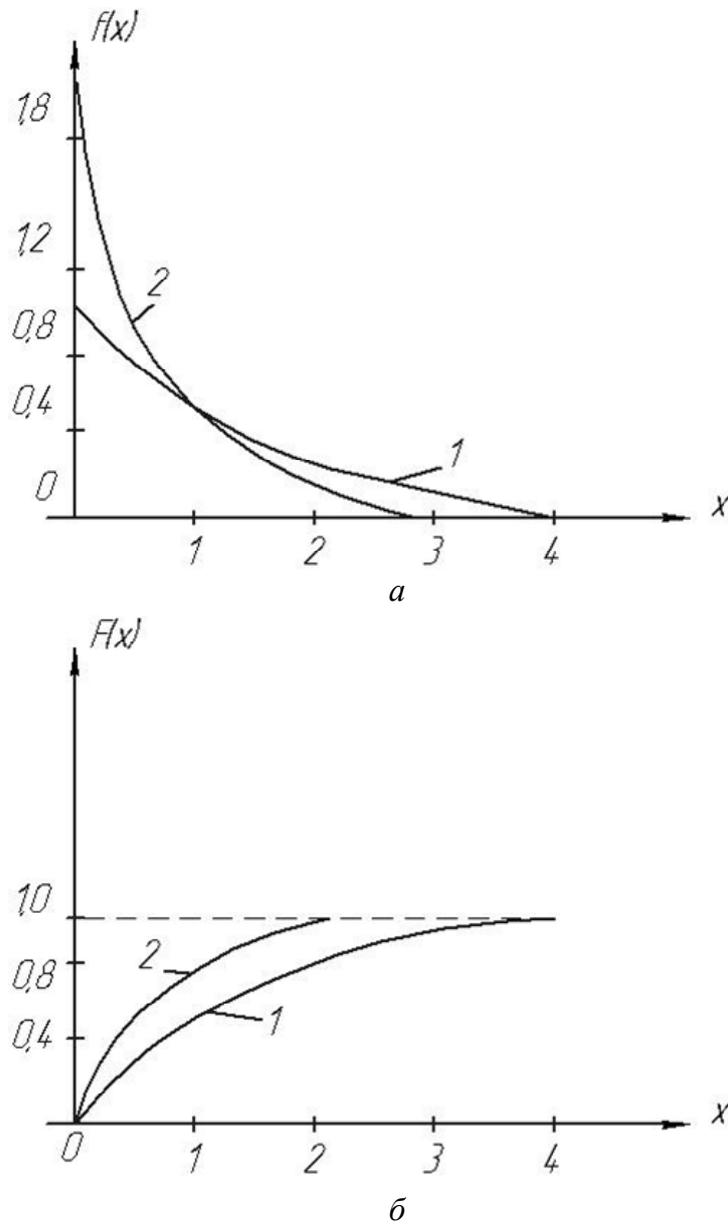


Рис. 2.4. Кривые распределения при экспоненциальном законе:
 а – плотности вероятности распределения; б – функции распределения:
 1 – при значении параметра $\lambda = 1$; 2 – при значении параметра $\lambda = 2$

Логарифмически-нормальное распределение – это распределение случайной величины, логарифм которой распределен по нормальному закону. Его применяют, когда значения случайной величины составляют долю наблюдавшегося явления. Это распределение используют для описания процессов восстановления, износа, когда его приращение идет мгновенно, наработки при быстрых отказах ненадежных элементов, усталостных отказов.

Плотность вероятности по этому распределению

$$f_{(x)} = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - a)^2}{2\sigma^2} \right] \text{ при } x \geq 0, \quad (2.36)$$

$$f_{(x)} = 0 \text{ при } x < 0.$$

Функция распределения

$$F_{(x)} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x \frac{1}{x} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln x - a)^2}{2\sigma^2} \right] dx. \quad (2.37)$$

Гамма-распределение является распределением математической статистики случайных величин, когда $0 \leq x < \infty$. Гамма-распределение служит для описания износных отказов и отказов вследствие накопления повреждений, наработки системы с резервными элементами, распределения времени восстановления.

Распределение Вейбулла используется для описания характеристик усталостных отказов металлических конструкций. Оно является наиболее общим распределением времени безотказной работы элементов, времени работы до предельного состояния, распределения сроков службы различных устройств и машин.

3. ОТКАЗЫ ГОРНЫХ МАШИН, ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

3.1. Оснащенность горнодобывающей отрасли горно-транспортным оборудованием на примере предприятий открытой угледобычи Кузбасса

Кузнецкий бассейн – единственный регион в угольной отрасли России, где сосредоточена основная часть горно-транспортного оборудования открытой добычи.

Экскаваторный парк Кузбасса по состоянию на 2010 г. состоял из 710 единиц, в том числе экскаваторы типа ЭКГ с прямой лопатой – 482 единицы (68 %), шагающие экскаваторы с оборудованием драглайн – 152 единицы (21 %), гидравлические экскаваторы с прямой и обратной лопатой – 76 единиц (11 %)

Наибольшее распространение получили экскаваторы с зубчато-речным напором – 249 единиц (51,7 %) производства машиностроительной корпорации «Уралмаш», экскаваторы с канатным напором ЭКГ-8И, ЭКГ-10, ЭКГ-12,5, ЭКГ-15 и их модификации составили 203 единицы (42,1%) производства «Ижорские заводы» и, на третьем месте экскаваторы с речным напором производства МК «Уралмаш» ЭКГ-12, ЖГ-14, ЖГ-20 – 30 единиц.

Зарубежные экскаваторы с речным напором 201м вместимостью ковша 16 м³ – 4 единицы, РН-2300 с ковшом вместительностью 16 м³ – 5 единиц, РН – 2300ХР с ковшом вместимостью 22 м³ – 2 единицы, РН-2800 – с ковшом вместимостью 33м³ (6 единиц) также успешно работают на разрезах Кузбасса.

Гидравлические экскаваторы, в основном зарубежного производства, дизель-гидравлические, вследствие их мобильности и малой удельной металлоемкости, с объемом ковша свыше 20 м³ позволяют качественно обрабатывать уголь, снижая его потери в кровле и почве пласта.

Отечественные гидравлические экскаваторы находятся в стадии промышленных испытаний, выпущенных опытно-промышленными партиями. Их освоение сдерживается отсутствием надежных отечест-

венных дизелей мощностью от 750 до 2500 л.с. и аппаратурой гидрооборудования большой производительности.

Шагающие экскаваторы – драглайны, в основном представлены малого и среднего класса (83%) производства ОАО «НКМЗ» (Украина).

Мощные и сверхмощные драглайны – 26 единиц, поставляются Уралмашем.

Шагающие экскаваторы – драглайны обеспечивают бестранспортную систему вскрытия, являющуюся наиболее экономичной. Однако экскаваторный парк драглайнов изношен на 90÷98 %. Срок службы значительной части их составляет 27÷35 лет против нормативных 25 лет.

В США применение бестранспортной схемы вскрытия считается экономически целесообразно при коэффициенте вскрыши $25\div 30 \text{ м}^3/\text{т}$. В целом по Кузбассу коэффициент вскрыши составляет $68 \text{ м}^3/\text{т}$.

Низкий объем бестранспортной вскрыши – 11% от общего объема добычи, объясняется повышенным износом действующего парка машин, высокой ценой драглайнов для обновления парка. Драглайны незаменимы при рекультивации горных отвалов и на погрузке угля, при оснащении их предельной разгрузкой ковша.

Буровое оборудование на 2010 г. в Кузбассе состояло из 180 буровых станков, в том числе шарошечного бурения – 90 %, шнекового – 10 %.

Станки отечественного производства составляют 78 %, импортные – 22 %.

Основная доля станков шарошечного бурения (91 %) состоит из станков ЗСБШ–200–60 производства ОАО «Бузулуктяжмаш». Импортные станки представлены лучшими зарубежными фирмами, значительная часть которых с дизельным приводом.

Средний износ буровых станков по амортизационным отчислениям равен 50%, по объемам бурения – порядка 60 %.

Процесс зарядания скважин взрывчатыми веществами полностью механизирован машинами МЗ–4, МСЗ–20 и смесительно–зарядными СЗМ–8.

Бульдозерная техника. Парк бульдозерной техники насчитывает 410 единиц. Основную долю бульдозерного парка составляет импортная техника (64 %) ведущих зарубежных фирм «Caterpillar» (93 единицы), «Dressta» (73 единицы), «Komatsu» (22 единицы) и «Liebherr» (4 единицы).

Техника отечественных заводов: «Промтрактор» (30 единиц), «Уралтракт» (30 единиц) и БелАЗ (11 единиц).

Отечественные бульдозеры менее надежны и не обеспечивают нормальную работу мощной экскаваторной и автотранспортной техники. Поэтому предпочтение отдается бульдозерам CAT-10R, CAT-9R, CAT-834, TD-25G, TD-40G, обслуживаемых зарубежными сервисными центрами.

Фронтальные погрузчики находят самое широкое применение в последние годы.

Колесные погрузчики высокоскоростные, малогабаритные и маневренные, могут работать в стесненных условиях. Структура парка погрузчиков (62 единицы) представлена в основном производителями зарубежных фирм: «Caterpillar» – 32 %, «Liebherr» – 32 %, «Dressta» – 10 %, «БелАЗ» – 5 %.

Погрузчики успешно конкурируют с экскаваторами вместимостью ковша до 12 м³.

Ввиду малого срока эксплуатации техническое состояние погрузчиков хорошее. Нарботка погрузчиков SW-560С, CAT-966F, CAT-988H не превышает нормативную, составляющую 50÷60 тысяч моточасов.

Автомобильный карьерный транспорт. В общих объемах работ автомобильный транспорт в Кузбассе занимает лидирующее положение и составляет свыше 80 %.

В настоящее время на разрезах Кузбасса работает 1290 большегрузных технологических автосамосвалов. На малых разрезах работают автосамосвалы малой грузоподъемностью от 30 до 42 т, на больших разрезах – грузоподъемностью 180, 200 и 220 т, а также 100÷130 т, их удельный вес в общем парке автосамосвалов равен соответственно 20 и 47 %.

Основной парк автосамосвалов представлен машинами производства ПО «БелАЗ» (Беларусь). Только на одном из разрезов работают 5 автосамосвалов фирмы «Caterpillar» CAT-785B, грузоподъемностью 136 т.

Железнодорожный карьерный транспорт включает локомотивный парк: тяговые агрегаты – 72 единицы и тепловозы – 114 единиц, думпкары – 1088 единиц, в том числе 2BC-105 – 914 единиц (84 %) и 6BC-60 – 174 единицы (16 %). Среднемесячное количество локомотивов составляет около 50 единиц. Износ тепловозов ТЭМ-2 составляет 90 %, ТЭМ-7 – 70 %.

Тяговые агрегаты ОПЭ–1 отработали 72,1 % своего ресурса. Износ думпкаров особенно велик и составляет 90÷98 %. Основная часть вагонов отработала свой срок службы – 15 лет.

Для обновления парка локомотивов приобретаются тепловозы ТЭМ–18 и СМ–2, тяговые агрегаты НП–1, обладающие лучшими тяговыми свойствами.

3.2. Техническое состояние горно-транспортного оборудования на примере Кузбасса

Эксплуатационный парк. Применение календарного фонда времени технических экскаваторов колеблется:

- от 67 до 75 % при использовании по назначению;
- от 12,9 до 14,9 % – плановые ремонты;
- от 3,5 до 7,9 % – плановые технические простои;
- от 5,6 до 15,1 % – внеплановые простои (из них аварийные 12÷44 %. Остальные внеплановые простои происходят из-за отсутствия запчастей и материалов, электроэнергии, автодорог, автотранспорта, железнодорожных путей, локомотивов, неподготовленности рабочего места, климатических условий и др.)

Техническое состояние оборудования на практике определяется его техническим ресурсом – наработкой до его предельного состояния, при котором его дальнейшая эксплуатация по назначению невозможна или нежелательна из-за снижения эффективности, или возросшей опасности для человека.

Техническое состояние можно определить по трем показателям: суммой начисленного износа (амортизации) в % от балансовой стоимости оборудования; наработкой экскаватором горной массы (млн м³) с начала эксплуатации в % от норматива наработки до списания; средним сроком эксплуатации парка экскаваторов (лет).

Нормы амортизационных отчислений должны быть обоснованными технически и экономически, изменяться с поставкой новой, более надежной техники.

Нормативная наработка – это назначенный технический ресурс, который для экскаваторов выражается в млн.м³ горной массы, для буровых станков – в тысячах погонных метров пробуренных скважин,

для бульдозеров и погрузчиков – в моточасах, для технических автосамосвалов – в тыс.км пробега, для железнодорожного транспорта – в млн т/км грузооборота. Она может не совпадать с нормативным сроком службы из-за разной интенсивности работы оборудования. Например, в ОАО УК «Кузбассразрезуголь» износ по амортизационным отчислениям экскаваторного парка составляет 71.1 % , по выполненным объемам 65,2 %, с истекшим ресурсом работает 44 единицы экскаваторов.

Средний срок эксплуатации парка экскаваторов в угольных разрезах Кузбасса составляет от 17,3 до 32,4 года.

С 2000 г. идет обновление экскаваторного парка. Из 76 экскаваторов, закупленных за 7 последних лет, доля отечественных составляет – 30 %, импортных – 70 %.

За последние 20 лет на Ижорских заводах не было разработано ни одной новой модели экскаваторов. Зарубежные экскаваторы более надежны, имеют большую емкость ковша (РН–2000РХ, РН–2800), более универсальны, работают с прямой и обратной лопатой (РН–200, вместимостью ковша 28 м³).

Буровое оборудование. Срок службы отечественной буровой техники на 20 % больше, чем импортной, но из-за низкой надежности за нормативный срок объемы пробуренных скважин импортной техникой превышают отечественные в 3,3 раза. Средний износ буровых станков по амортизационным отчислениям равен 50 %, по объемам бурения – 60 %.

Бульдозерная техника. Средний срок эксплуатации бульдозеров за последние 5 лет снизился с 5,7 года до 4 лет вследствие пополнения новыми, импортными машинами на 64 %. Коэффициент готовности и технического использования парка бульдозеров составляют 0,81÷0,85 и 0,68÷0,81 соответственно.

Техническое состояние парка *погрузчиков* удовлетворительное вследствие их высокой надежности. Погрузчики импортные, в России погрузчики для горных работ не выпускаются.

Техническое состояние технических *автосамосвалов* оценивается остаточной стоимостью (износом) (%) и суммарным пробегом в (тыс.км).

Износ по амортизационным отчислениям автосамосвалов по Кузбассу в среднем составляет 38,4 %, износ по пробегу – 50,2 %. Основная доля обновления парка машин производится в крупных компаниях до 11÷13 % ежегодно. Ввиду повышения эффективности рабо-

ты и снижения численности персонала приобретаются большегрузные автосамосвалы, грузоподъемностью 200 т и выше.

Анализ технического состояния железнодорожного карьерного транспорта показывает, что до половины локомотивного парка отработала установленный срок службы – 20 лет.

Износ наиболее многочисленных тяговых агрегатов ОПЭ–1 составляет 90 %, тепловозов ТЭМ–7 и ТЭМ–2 от 70 до 91%; думпкары 2ВС–105 и 6ВС–60 изношены на 90 %.

Аварийные ремонты тяговых агрегатов случаются из-за отказов: дизеля – 53 %, электрооборудования – 35 %, ходовой части – 9 %, пневмооборудования – 3 %.

Коэффициент готовности агрегатов и думпкаров колеблется по различным предприятиям от 0,7 до 0,95.

За годы преобразований в России заводы горного машиностроения отстали от зарубежных фирм в производстве новой техники. Отечественная техника в большинстве своем морально и физически устарела, малонадежна.

Для проектирования, организации производства, освоения новой горно-транспортной техники необходимо знать методы и способы создания техники с заданными показателями надежности – основного показателя качества продукции.

При освоении новой техники главное – обеспечение ее работоспособности. Потеря работоспособности – состояние отказа. Явление, процессы, события и состояния изделия обуславливают причину отказа. Поэтому исследование причин отказов невозможно без знания физической сущности появления отказов.

3.3. Физическая природа и причины отказов

Основы и причины физических отказов

Основной причиной отказов изделий являются действующие на них нагрузки, превышающие несущую способность элемента изделия.

При работе машин на детали и узлы воздействуют различные виды нагрузок и напряжений, которые можно разделить на рабочие и постоянно действующие. Рабочие действуют в результате работы изделия. Постоянно действующие обусловлены условиями эксплуатации горных машин, внешними воздействующими факторами.

Рабочие нагрузки можно разделить на механические, тепловые, химические, электрические и гидравлические. Как правило, детали и узлы одновременно подвергаются воздействию нескольких видов нагрузок. Все эти нагрузки являются определенными, их величины являются случайными функциями времени, и природа их возникновения связана со сложными физическими процессами.

К постоянно действующим факторам внешней среды относятся: окружающая температура, влажность и загрязненность воздуха, химическая агрессивность шахтных вод и др. Эти нагрузки также являются случайными функциями времени, но им характерна меньшая степень изменчивости.

Несущая способность элементов изделия определяется свойствами используемых материалов, конструктивным исполнением, соблюдением правил эксплуатации.

При превышении действующих нагрузок над несущей способностью детали наступает отказ.

Потеря прочности детали возникает, когда фактическое напряжение достигает значения, превышающего прочностные характеристики материала детали: предела прочности, текучести, выносливости и т.д.

Отказы возникают и при потере устойчивости, которая характеризуется тем, что элемент после дополнительного упругого деформирования на некоторую величину не возвращается в исходное состояние.

Для сложных конструкций возможны отказы из-за потери жесткости, т.е. потери способности изделия сопротивляться изменению формы под действием нагрузки.

В целом отказы возникают как при превышении нагрузки статической прочности деталей, так и в результате усталостных разрушений, износа, старения материалов, их коррозии.

Физико-химические процессы, приводящие к отказам

При проектировании изделий конструктор определяет нагрузки, действующие на деталь, выбирает материал с необходимыми прочностными свойствами, чтобы напряжение и деформации в ней согласовывались с характеристиками материалов. Детали, работающие в условиях агрессивных сред или в экстремальных температурных условиях, изготавливаются из нержавеющей, жаропрочных или низколегированных сталей (для условий низких температур).

Физико-химические явления могут вызывать деформацию, износ, коррозию и другие повреждения. Химическая энергия вызывает коррозию в элементах изделия. Повреждение поверхности приводит сначала к ухудшению параметров изделия, а затем к его разрушению, т. е. к отказу.

Быстропротекающие процессы изменяют действующие нагрузки в доли секунды. Например, в дизельном двигателе усилие, воздействующее на трущиеся пары, изменяется по величине и направлению в период $0,15 \div 0,25$ с. При медленных процессах изделия работают от начала до окончания эксплуатации, несмотря на протекающие необратимые процессы старения, ползучести металлов, коррозии, усталости материалов и др.

Физико-химические процессы, приводящие к отказам, классифицируются на группы в зависимости от вида материала, места протекания процесса, вида энергии и эксплуатационного воздействия, определяющего характер процесса.

Материалы большинства горных машин представляют собой кристаллические твердые тела. Это металлы, ионные кристаллы (диэлектрики), ковалентные кристаллы (полупроводники). Кроме твердых тел используют органические и неорганические полимеры.

Твердые материалы могут иметь дефекты кристаллической структуры, которые в определенных условиях приводят к отказам. Дефекты приводят также к изменению электрофизических свойств материала.

Старение материалов

Старением материалов называется изменение их физико-механических свойств под воздействием атмосферных условий при длительном хранении и эксплуатации.

Старение может приводить как к улучшению, так и к ухудшению отдельных свойств материалов. К старению материалов и сплавов относятся все процессы изменения их свойств во времени с превращением металлов и сплавов в твердом состоянии.

К основным видам превращений в твердом состоянии относятся: аллотропическое превращение, мартенситное превращение и распад мартенситной структуры, растворение в твердом состоянии и распад пресыщенных твердых растворов, образование твердого раствора из эвтектоидной смеси.

Эти процессы разделяются на процессы с изменением кристаллической структуры без изменения химического состава, образующихся при превращении фаз и на превращения с образованием фаз с измененным химическим составом.

Старение неметаллических материалов: резины, пластмасс, полимеров является основным фактором их долговечности.

Отказы электрических устройств

Отказы возникают из-за чрезмерного напряжения, повышенных частоты и силы тока в обмотках электрических аппаратов. Разрушение твердых диэлектриков и полупроводников под действием электрического тока могут быть двух видов: пробой толщи материала и разряд по его поверхности.

Наибольшие разрушения вызывает электрический пробой изоляционных материалов, приводящий к короткому замыканию электрических цепей.

Диэлектрики и полупроводники обладают определенной электрической прочностью, характеризуемой критической напряженностью электрического поля, при которой начинается рост электропроводимости.

Различают пробой чисто электрический при низких температурах и тепловой пробой при высоких температурах.

Наиболее вероятным механизмом электрического пробоя является ударная ионизация электронами или ионами. При движении в решетке материала электроны проводимости отдают энергию электрического поля атомам или ионам кристаллов. Концентрация носителей в зоне проводимости увеличивается. В порах воздушных и газовых включений возникают микрозаряды, создающие условия для пробоя.

При эксплуатации оборудования разрушение изоляции проводников происходит под воздействием многих факторов: напряжения, температуры, влажности, загрязнений поверхностей, пор, трещин, старения материалов и др.

Отказы из-за превышения нагрузок

Прочность – это свойство материала сопротивляться разрушению и изменению формы под действием внешних и внутренних нагрузок. Параметрами прочности являются пределы прочности, пропорциональности, текучести, ползучести, выносливости и др. Разли-

чают два вида деформации: упругую, исчезающую после снятия нагрузок и пластическую, остающуюся после удаления нагрузок.

Основными параметрами деформации служат относительное остаточное удлинение и величина уменьшения площади поперечного сечения изделия.

Прочностная надежность – это свойство изделия сохранять во времени работоспособность при воздействии на него внешних нагрузок.

Отказы по параметрам прочности бывают хрупкие и вязкие.

Хрупкий излом происходит без признаков микроскопических пластических деформаций. Он возникает в упругой зоне деформирования. Хрупкое разрушение распространяется с большой скоростью, сопоставимой с распространением звука в данном материале. Хрупкое разрушение происходит тогда, когда нагрузки превышают предел прочности материала и когда появляются факторы, препятствующие пластическим деформациям.

В общем случае надежность детали по схеме «нагрузка – прочность» определяется условием [7]:

$$R_{(t)} > N_{(t)}, \quad (3.1)$$

где $R_{(t)}$ – несущая способность детали; $N_{(t)}$ – действующая на деталь нагрузка.

Надежность изделия определяется вероятностью:

$$P[R_{(t)} > N_{(t)}] = P_{(t)}. \quad (3.2)$$

При этом нагрузка рассматривается результирующая (усилия, давление, вибрация, старение и т. д.).

Если предельно допустимые значения несущей способности $R_{(t)}$ и действующей нагрузки $N_{(t)}$ с их математическим ожиданием m и среднеквадратичным отклонением σ имеют нормальное распределение, тогда точечная оценка критерия надежности, определяется по формуле

$$P_{(t)} = 1 - \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(R) \cdot f(N) dR dN. \quad (3.3)$$

Для хрупкого разрушения безотказность в течение заданного времени обеспечивается запасом прочности детали:

$$n = \frac{\sigma_R}{\sigma_N}, \quad (3.4)$$

где σ_R – предел прочности; σ_N – максимальное напряжение нагрузки.

Вероятность неразрушения детали определяется с учетом Φ – функции Лапласа по выражению

$$P = 1 - \Phi \left(\frac{1 - \bar{n}}{\sqrt{Y_N^2 - \bar{n}^2 \cdot Y_R^2}} \right), \quad (3.5)$$

где \bar{n} – средний запас прочности; $Y_N = \frac{d\sigma_N}{\sigma_N}$; $Y_R = \frac{d\sigma_R}{\sigma_R}$.

Пластическому излому предшествует микроскопическая пластическая деформация, вызванная сдвигом в плоскостях скольжения или скола границ металлографических зерен.

В зависимости от нагрузок изломы подразделяются на динамические, усталостные, от превышения пределов прочности, от изгибающих и скручивающих нагрузок. К динамическим относятся изломы, произошедшие внезапно под действием ударных или динамических нагрузок. Они бывают хрупкими с крупнозернистой поверхностью излома и гладкие от сдвига по направлению максимальных касательных напряжений.

К усталостным относятся изломы, произошедшие от переменных нагрузок, когда нагрузки превышают предел выносливости материала.

В зависимости от напряженных состояний могут быть поверхностные или общие усталостные разрушения. Усталость металла (материала) ограничивает срок службы деталей. Если переменные нагрузки выше некоторого уровня, возникают отказы из-за усталости. Этот уровень характеризует предел выносливости. Кривая выносливости (рис. 3.1), изображенная в координатах $\sigma_t - N$ – предел выносливости, N – число циклов нагружения, показывает, что если напряжения σ_{ti} превышают длительный предел выносливости σ_{t0} , то деталь будет работать ограниченное число циклов N_i . Если напряжения равны или меньше σ_{t0} , то срок службы детали теоретически не ограничен.

Усталость приводит к внезапному разрушению после развития усталостной трещины. От усталости разрушаются зубья шестерен, валы и оси, подшипники, пружины, болты и другие детали.

Изломы, вызванные превышением предела прочности, занимают среднее положение между динамическими и усталостными изломами. Они характеризуются большой поверхностью окончательного излома. По направлению излома можно определить какая нагрузка вызвала излом: перегрузка растяжения, кручения или изгиба.

Усталостные изломы при изгибе подразделяют на односторонние, двухсторонние и изломы на вращающихся деталях. В этом случае несколько трещин, расположенных по диаметру, сливаются, и зона окончательного разрушения располагается ближе к центру круглой детали.

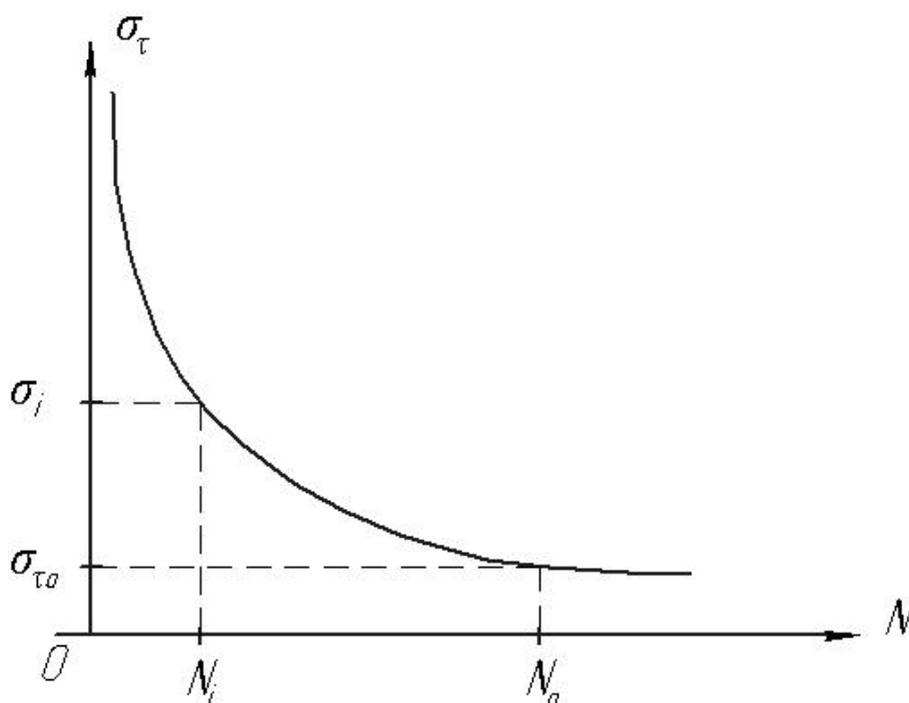


Рис. 3.1. Кривая выносливости материалов

Ползучесть – это явление, выражающееся в том, что нагруженный металл при высокой температуре, непрерывно деформируется под воздействием постоянно действующих напряжений. Сопротивляемость металла действию нагрузок снижается. Это явление называется пределом длительной прочности.

Различают три стадии процесса ползучести (рис. 3.2). При приложении нагрузок происходит мгновенная деформация изделия, не связанная с процессом ползучести (участок OA). Участок AB характеризуется деформацией с убывающей скоростью (участок неустановившейся ползучести). На участке BC пластическая деформация возрастает с постоян-

ной скоростью (установившаяся ползучесть). Участок CD показывает увеличение скорости ползучести до разрушения изделия.

Многие отказы возникают после образования микротрещин и их дальнейшего развития.

Процесс трещинообразования носит постепенный характер. Он состоит из последовательного соединения соседних микротрещин и ускорения роста одной.

Для обеспечения прочности деталей обычно повышают прочностные характеристики материала ее изготовления. Однако увеличение прочностных характеристик металла приводит к росту чувствительности материала к образованию трещин.

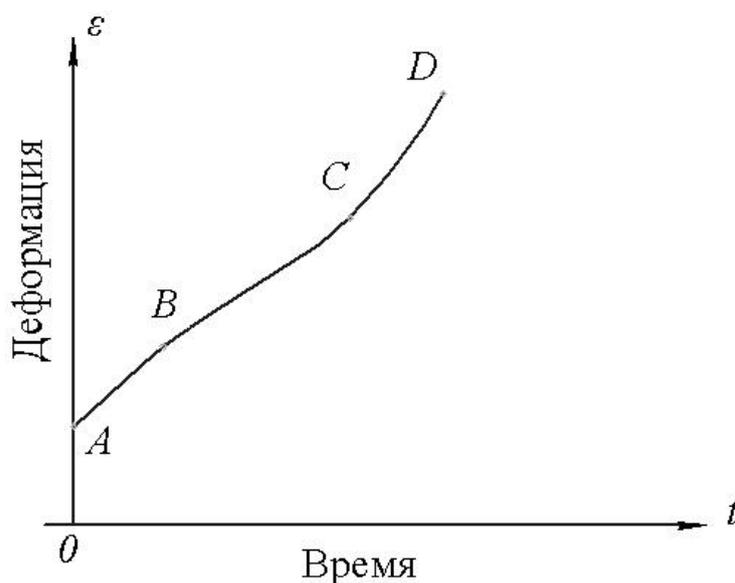


Рис. 3.2. Кривая ползучести

Исследования показали, что трещиностойкость существенно зависит от вида напряженного состояния в вершине трещины и в значительной степени определяет – будет ли разрушение хрупкое или вязкое.

Вязкость и форма разрушения материала одной марки зависят от заготовки, технологии изготовления детали, размеров, температуры и т.д.

Наличие упрочненного слоя у основания тещины препятствует ее появлению и распространению.

Отказы вследствие износа

Износ – это процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела, проявляющийся в изменении геометрических размеров, формы и состояния трущихся поверхностей. При тре-

нии протекают механические, электрические, магнитные, тепловые вибрационные и химические процессы, Трение может упрочнить или разрушить металл, повысить или уменьшить содержание в нем углерода, насытить металл водородом или обезводить его, превратить золото и платину в окислы, отполировать детали или сварить их.

На преодоление трения в транспортных машинах расходуется больше половины потребляемого топлива. Вопросами трения занимается наука трибология и триботехника. Трибология – это наука, изучающая процессы изнашивания с учетом свойств материалов и смазки. Триботехника – наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, износа и смазки машин и механизмов. Под трибологической надежностью понимается свойство изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность изделия выполнять все требуемые функции в условиях трения и изнашивания.

Показателями, характеризующими трибологическую надежность, являются скорость и интенсивность изнашивания. Скорость изнашивания – это отношение величины износа к интервалу времени, в течение которого это изнашивание произошло. Различают мгновенную и среднюю скорость изнашивания. Интенсивность изнашивания – это отношение величины износа к пути трения, на котором произошло изнашивание.

Статистические данные свидетельствуют, что износ является главной причиной списания горных машин и оборудования, и отказы, по причине износа, составляют 40÷70 % всех отказов при их эксплуатации.

Количественно трение может оцениваться:

- силой трения (силой сопротивления перемещению трущихся тел);
- коэффициентом трения (отношением силы трения к нормальной составляющей внешних сил, действующих на трущиеся тела).

Трение бывает трением покоя при микроскопическом смещении тел в состоянии покоя, трением движения при движении трущихся тел, трением качения и скольжения.

К трению качения относят трение движения твердых тел, при котором скорости в точках их касания одинаковы по величине и на-

правлению. При трении скольжения скорости в точке касания различны по величине и направлению.

Значение величины износа, при котором изделие сохраняет работоспособность, называется допустимым износом. При наступлении предельного износа, определяемого по нормативно–технической документации изделия, наступает предельное состояние изделия, после чего эксплуатация его должна быть прекращена.

К середине прошлого века триботехника освещала три раздела, связанных между собой:

- 1) трение несмазанных поверхностей (сухое трение);
- 2) граничное трение (в адсорбированном граничном слое смазки толщиной менее 0,1 мкм;
- 3) гидродинамическое трение (жидкостное трение определяет промежуточный слой смазки между трущимися поверхностями).

Но с 1956 г. был открыт эффект безызносности. Установленный вид трения, когда из одного из материалов, участвующих в трении (бронзы, латуни или другого медного сплава), или из смазочного материала, содержащего соединения металлов или металлоорганические соединения, образуется металлическая пленка, был назван безызносным трением. Металлическая пленка толщиной 1,0÷1,5 мкм образуется только при работе узла трения. Образование металлической пленки на трущихся поверхностях определяет самоорганизующийся характер трения, при котором трущаяся пара обменивается с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов металла, из которых формируется металлическая пленка. Она представляет собой металл в особом состоянии, образующийся только в процессе трения.

Уплотнений для таких пар трения не требуется.

В целом изнашивание пар трения имеет следующие виды: механическое, абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, эрозионное, усталостное, кавитационное, молекулярно–механическое, коррозионно–механическое, окислительное, электрическое, водородное.

Механическим называют изнашивание вследствие механических воздействий. Они бывают при упругом контакте, пластическом деформировании и при микрорезании. Механическое воздействие сопровождается возникновением напряжений в зоне контакта поверхностей, зависящих от их шероховатостей.

Упругое оттеснение материала выступами неровностей поверхностей происходит, когда нагрузки и адгезия не превышают в зоне

контакта предел текучести материала. Отказ в этом случае в виде разрушения материала возможен в результате фрикционной усталости.

Пластическое деформирование материала происходит, если контактные напряжения превышают предел текучести. Материал обтекает выступы другого материала, и на его поверхности образуются глубокие вмятины. Износ здесь является результатом малоциклового фрикционной усталости.

Микрорезание возникает, когда контактные напряжения достигают разрушающих значений. В этом случае имеют место глубокие повреждения, разрушение тонких пленок с начала эксплуатации.

В процессе трения за счет многократного пластического деформирования форма неровностей меняется, выступы неровностей наклепываются. Твердость материала в точках контакта возрастает, происходит переход пластического деформирования в упругое.

Абразивное изнашивание – это механическое изнашивание в результате режущего, царапающего или иного действия твердых тел или частиц. Твердость абразивных частиц должна быть больше или равна твердости трущихся поверхностей.

Абразивные частицы оказывают царапающее действие. При этом происходит отгеснение материала трущихся поверхностей, а дно канавки наклепывается. После многократной пластической деформации металл, деформированный по сторонам канавки, наклепанный и перенаклепанный на дне канавки, охрупчивается, в нем возникают микротрещины, приводящие к разрушению поверхности тела. При больших скоростях возможно повышение температуры и структурные изменения материалов. Износ возрастает.

Абразивное изнашивание пар трения из полимерных материалов определяется степенью их эластичности. При движении абразивной частицы по их поверхности впереди частицы в полимере образуется сжатие, а сзади – растяжение. При многократном воздействии сжимающих и растягивающих напряжений полимерный материал разрывается. Происходит отказ трущейся пары.

Гидроабразивным, газоабразивным и эрозионным изнашиванием называют соответственно изнашивание в результате воздействия абразивных частиц, увлекаемых потоком жидкости, газов, ударов высокосортного потока жидкости, газов или пара.

Усталостным называется изнашивание поверхности трения в результате повторного деформирования микрообъемов материала, приводящего к появлению трещины и отколу частиц (выкрашива-

нию). Такой вид износа характерен для подшипников качения, зубчатых пар редукторов. Интенсивность и время выкрашивания определяется величиной контактных напряжений, числом циклов нагружений, твердостью материала, состоянием обработки поверхностей и толщиной слоя смазки. В процессе работы усталостное выкрашивание приводит к образованию раковин, возникают шум и вибрация в узлах трения, повышаются контактные напряжения, увеличивается пластическая деформация, идет повышенный износ.

Кавитационным изнашиванием называется изнашивание поверхности при движении твердого тела и жидкости в условиях кавитации. При этом поверхностный слой подвергается высокочастотным локальным гидравлическим ударам в кавитационной области потока жидкости.

Этому износу подвергаются лопасти центробежных насосов, запорные устройства и арматура гидроприводов. Чаще всего кавитационный износ наблюдается на поверхностях, обтекаемых жидкостью с большой скоростью. При завихрении поток жидкости разрывается и в нем образуется пустота в виде пузырьков размером в десятые доли миллиметра, заполняемых газом или воздухом, растворенным в жидкости. За тысячные доли секунды пузырьки увеличиваются в десятки раз и разрушаются. При разрушении пузырьков в них с большим ускорением устремляется рабочая жидкость, создавая гидравлические удары и ультразвуковые колебания. Поверхности от гидравлических ударов разрушаются.

Кроме этого, кавитационные явления вызывают шумы и вибрации, приводящие к расшатыванию крепежных изделий, нарушению уплотнений, коррозионно-усталостным отказам несущих конструкций.

Молекулярно-механическое изнашивание происходит при совместном воздействии механических нагрузок молекулярных или атомных сил. Например, при заедании, изнашивание происходит из-за схватывания пар трения, вырывания и переноса материала с одной поверхности на другую.

В тихоходных узлах возникает холодное заедание, в быстроходных и тяжелонагруженных узлах – горячее.

Коррозионно-механическое изнашивание заключается во взаимодействии трущихся пар с окислительными процессами среды. Ему подвергаются уплотнительные кольца центрифуг, подшипники скольжения герметичных насосов, плунжеры насосов. Агрессивная

среда – основной признак окислительного изнашивания. Наличие электрического потенциала может вызвать электрохимическое воздействие материала со средой.

Окислительное изнашивание происходит тогда, когда на соприкасающихся трущихся поверхностях образуются окислы в виде пленки. Продукты износа состоят из этих окислов.

Электрическое изнашивание происходит преимущественно в контактной зоне вследствие переноса ионов одного материала на другой, при появлении окисных пленок с последующим микросхватыванием и глубинными вырываниями, искрением и дугообразованием, приводящих к большой тепловой энергии между контактами. Происходит ухудшение качества контактных поверхностей, интенсифицирующих механический износ.

В целом электромеханическое изнашивание зависит от силы и направления движения электрического тока, величины контактного электросопротивления, скорости перемещения контактов, механической нагрузки между ними, температуры контактных поверхностей, теплообменом, загрязнением окружающей среды, материалами окружающих деталей, чистоты контактных поверхностей и их обработки.

Коррозийные отказы

Коррозия – это разрушение металла вследствие химического или электрохимического взаимодействия с коррозионной средой. Коррозия не только приводит изделие к отказу, но и ускоряет процессы изнашивания, усталостного разрушения, снижает прочностные характеристики материалов.

Критерием возникновения коррозионных отказов служит величина коррозии или ее скорости. Определяющими показателями надежности являются наработка на отказ при коррозии, средний срок сохраняемости. Коррозия бывает поверхностная и внутримолекулярная. Кроме этого различают химическую и электрохимическую коррозию.

Электрохимическая коррозия – это взаимодействие металла с коррозионной средой (раствором электролита), при котором ионизация атомов металла и восстановления окислительной компоненты протекают не в одном акте и их скорости зависят от электродного потенциала. Она появляется на разделе сред металл – электролит. Электрохимическая коррозия бывает:

- коррозия внешним током (от внешнего источника);
- коррозия блуждающим током;

- контактная коррозия (контакты металла и электролита имеют разные потенциалы).

Химическая коррозия происходит тогда, когда взаимодействие металла с коррозионной средой происходит одновременно.

Различают следующие виды химической коррозии:

- газовая, когда происходит коррозия металла в газе при высоких температурах;
- атмосферная коррозия происходит в атмосфере воздуха при различной его влажности;
- коррозия пар трения, когда разрушение происходит под действием коррозионной среды и трения;
- феттинг – коррозия происходит при колебательном движении поверхностей относительно друг друга в коррозионной среде.

На скорость распространения коррозии влияют химический состав и структура металла, состояние его поверхности, а так же вид и состав окружающей (коррозионной) среды. Для повышения коррозионной стойкости используют два метода – отделение металла от коррозионной среды и снижение агрессивных свойств коррозионной среды.

К технологическим методам повышения коррозионной стойкости относятся лакокрасочные покрытия, металлические, гальванические, химические и другие покрытия.

Классификация отказов

Отказы технологических машин и оборудования классифицируются:

- по характеру утраты работоспособности на внезапные и постепенные;
- по взаимосвязи с другими отказами на зависимые и независимые;
- по возможности контроля на контролируемые и неконтролируемые;
- по характеру повреждения на допустимые и недопустимые;
- по причине возникновения на конструкционные, технологические, (заводские), эксплуатационные;
- по времени возникновения: при хранении, транспортировании, при эксплуатации до капитального ремонта, после ремонта.

Для определения показателей надежности детали, узла, установления причины отказа необходима полнота информации об отказе на месте его обнаружения. Необходимо выполнить следующие действия:

- произвести наработку испытуемого изделия от начала эксплуатации до каждого отказа и наработку между отказами;
- установить время отказа, астрономическое (год, месяц, дату);
- уточнить вид отказа, разрушения, излома, износа, течи, заедания и т. д.;
- определить условия окружающей среды в момент отказа (температура, влажность, вибрации, удары и т.д.);
- определить действия эксплуатирующего персонала в момент отказа.

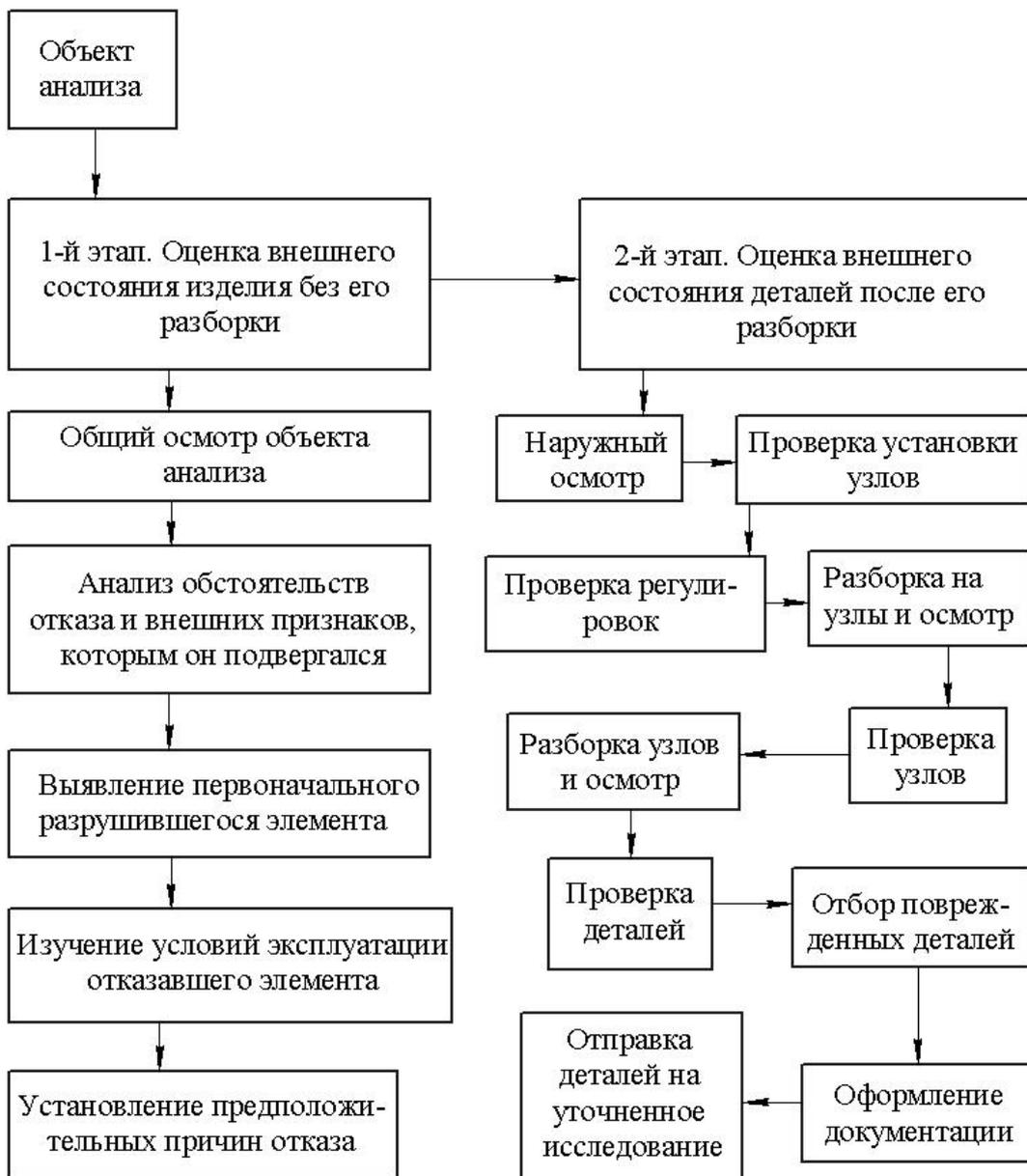


Рис. 3.3 Схема установления причин отказов на месте их обнаружения

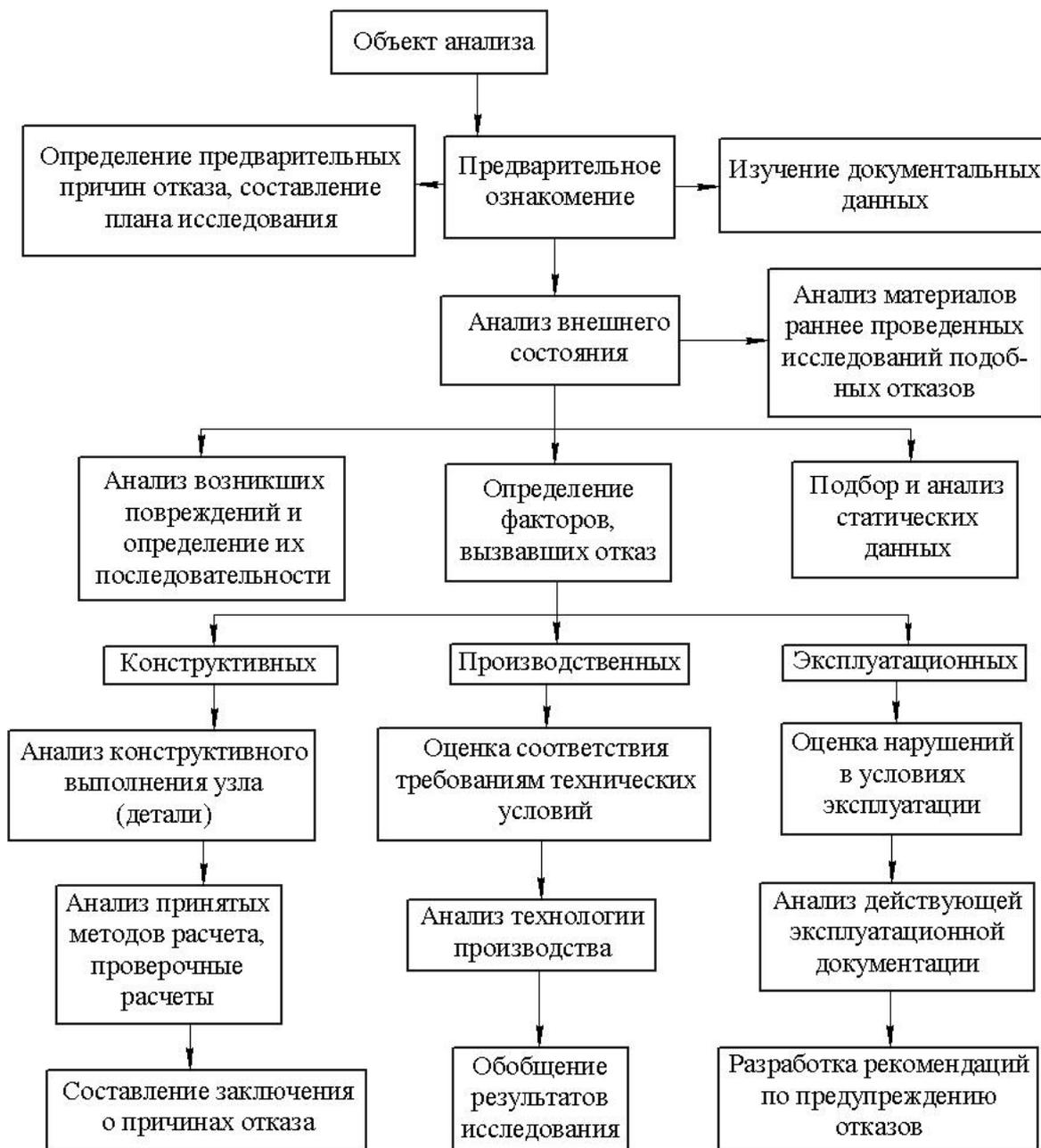


Рис. 3.4 Схема уточненного исследования отказов

Наиболее вероятные причины возникновения отказов могут быть: износ и нарушение условий трения, недостаточная прочность, недопустимые деформации, старение и коррозия материалов, нарушение регулировок и центровок, нарушение креплений и соединений отдельных узлов и деталей, неправильное назначение допусков и посадок, нарушение герметичности гидравлических и пневматических систем, замерзание конденсатов или перегрев рабочих жидкостей. Схемы установления причин отказов на месте их обнаружения и при уточненном исследовании отказов приведены на рис 3.3, 3.4.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

4.1. Организация работ по обеспечению надежности изделий на стадии проектирования

На этапе разработки технического задания на проектирование нового или модернизируемого изделия определяют требования к показателям надежности. Эту работу выполняют на основе предварительного структурного анализа надежности будущего изделия. На основе этого анализа разрабатывают требования к ресурсным показателям сборочных единиц изделия, определяющих периодичность текущих и капитальных ремонтов и ремонтные затраты на восстановление работоспособности каждого узла проектируемой машины.

При разработке технического предложения, эскизного и технического проектов, требования к показателям надежности узлов являются основой для определения требований к показателям надежности деталей, что, в свою очередь определяет периодичность замены каждой детали и номенклатуру заменяемых деталей и ремонтируемых узлов. Определяются также объемы затрат в каждом планово-предупредительном ремонте.

На этом этапе технического проектирования выполняют обоснование требований к комплексным показателям надежности.

На этой же стадии проектирования определяют номенклатуру узлов и деталей, подлежащих стендовым испытаниям, с целью определения их средних ресурсов. Для проектирования стендового испытательного оборудования разрабатывают технические задания, рабочую техдокументацию. Изготовление стендов и испытания на них узлов и деталей изделий должно опережать изготовление опытного промышленного образца всего изделия.

На этапе разработки рабочих чертежей изделия проводят расчеты обеспечения ресурсных показателей деталей и расчет объема производства запасных частей на каждый год эксплуатации изделий.

На основе этих данных проводят необходимую корректировку конструктивных параметров наименее надежных деталей с целью увеличения их ресурсных показателей и полного удовлетворения потребителей запасными частями будущих изделий.

Этап изготовления опытного образца предусматривает всесторонние испытания, которые дают оценку как характеристикам функционирования изделия, так и фактическим показателям надежности. Испытание узлов проводят до разрушения основных (базовых) деталей и до их предельного состояния, оговоренного в программе испытаний.

Акты поузловых испытаний изделий служат основанием для оценки его качества при государственных приемочных испытаниях изделия.

Система испытаний обеспечивает всестороннюю проверку работоспособности и надежности изделий и сокращает сроки освоения новой техники. Это достигается за счет: параллельно-последовательного проведения всех испытаний; применения поузлового проведения испытаний, позволяющему дифференцировать результаты испытаний по каждому элементу изделия; широко использовать ускоренные методы испытаний узлов на надежность; рационально организовать сетевое планирование всего процесса испытаний; сокращения длительности приемочных испытаний изделия в целом.

При серийном производстве изделий предусматриваются заводские испытания узлов и изделия в целом на работоспособность, а также периодические контрольные испытания узлов на надежность и наблюдение за работой машин в условиях эксплуатации.

Это необходимо для контроля стабильности технического процесса изготовления изделий, оценки эффективности конструктивных изменений, новых способов изготовления деталей и узлов.

Контроль показателей надежности серийных изделий осуществляет предприятие-изготовитель изделия путем организации систематических наблюдений и сбора информации за работой машины в эксплуатации.

Наблюдение производится выборочным методом с целью установления фактических показателей надежности изделий в целом, их узлов и деталей и получения данных для разработки мероприятий по улучшению показателей надежности изделий.

4.2. Методика сбора информации о надежности машин

Целью сбора и обработки информации о надежности является получение ее количественных показателей, позволяющих разработать мероприятия по повышению надежности, установить нормы запасных частей и ремонтных нормативов.

Для достижения данной цели необходимо:

- накопить статистические материалы, оценивающие количественные показатели надежности;
- уточнить техникоэкономические показатели машин, зависящие от надежности;
- изучить условия эксплуатации, влияющие на надежность;
- разработать мероприятия, устраняющие конструктивные и технологические недостатки машин;
- установить статистические закономерности потоков отказов и их восстановлений, определить законы распределения ресурсов изделий и их элементов;
- изучить характер и причины отказов изделий и их элементов, степень их влияния на надежность машин;
- обосновать и контролировать эффективность мероприятий по повышению надежности машин.

Количественные показатели надежности получают двумя методами – по результатам специальных испытаний машин на надежность и по результатам работы машин в реальных условиях эксплуатации.

При первом методе испытания проводят на стендах, имитируя условия эксплуатации и нагрузки. Испытания трудоемкие, требуют значительных затрат и не всегда возможны по различным причинам. Однако полученные результаты достоверны и получаются за сравнительно короткие сроки.

При втором методе стоимость работ незначительна, длительность наблюдения определяется количеством работающих изделий и продолжительностью всего процесса эксплуатации. Но процесс эксплуатации не зависит от исследователя, требует большого числа наблюдателей, и оценивать можно существующее изделие, а не вновь разрабатываемое.

При исследованиях изделий на надежность ведутся хронометражные наблюдения за всеми видами работ, технического обслуживания и ремонтов; регистрируется наработка деталей и узлов до их

ремонта или замены; ведется учет расходов запчастей, времени простоев в плановых и аварийных ремонтах.

Полученная информация фиксируется в картах хронометражных наблюдений и в журнале эксплуатационных наблюдений, являющегося приложением к формуляру изделия.

Информация о надежности должна быть полной и содержать условия режима эксплуатации, время простоев по организационным причинам и на техобслуживание и ремонта, время наступления и устранения отказов, причины отказов.

Информационные материалы должны содержать такое количество наблюдений, которое явилось бы достаточным для определения показателей надежности.

Необходимое число смен наблюдений ориентировочно можно определить по формуле

$$N_{\text{см}} = \frac{n \cdot T}{K_7 \cdot K_p \cdot t_{\text{см}}}, \quad (4.1)$$

где n – количество отказов, которое необходимо зарегистрировать при наблюдениях; T – возможная величина наработки на отказ изделия, в часах; K_7 – коэффициент непрерывности работы изделия; K_p – коэффициент, учитывающий режим организации работы участка (одного, двух, трехсменный); $t_{\text{см}}$ – продолжительность смены, в ч.

Количество отказов n , которое необходимо зарегистрировать определяется в зависимости от требуемой достоверности γ и коэффициента точности δ_3 .

Величина γ принимается в пределах $0,9 \div 0,95$.

Коэффициент δ_3 определяют по выражению

$$\delta_3 = \frac{1}{1 + \varepsilon}, \quad (4.2)$$

где ε – допустимая величина относительной ошибки, принимаемая для практических расчетов равной $0,05 \div 0,15$.

Коэффициент K_p , учитывающий режим работы участка, определяют по формуле

$$K_p = \frac{Z \cdot t_{\text{см}}}{24}, \quad (4.3)$$

где Z – число рабочих смен в сутки.

Средняя продолжительность наблюдений за каждым изделием находят следующим образом:

$$t_{\text{cp}} = \frac{N_{\text{см}}}{K_0 \cdot M}, \quad (4.4)$$

где M – количество изделий, взятых под наблюдение.

Или с учетом выражений (4.1) и (4.4) для $N_{\text{см}}$

$$t_{\text{cp}} = \frac{n \cdot T}{K_3 \cdot K_p \cdot K_0 \cdot t_{\text{см}}}, \quad (4.5)$$

где n – количество машин исследуемого типа, находящихся в идентичных условиях эксплуатации; K_0 – коэффициент охвата, принимаемых для серийных машин – 0,3, для опытной партии – 0,6, для опытных образцов – 1,0.

4.3. Обработка статических данных о надежности

При исследованиях горных машин ведется выборка из генеральной совокупности (генеральной совокупностью называют все множество однотипных машин).

С увеличением объема выборки функция распределения исследуемого параметра приближается к функции распределения для генеральной совокупности.

Однако статистические данные содержат элемент случайности. И полученные на их основе количественные показатели надежности можно принять с некоторой вероятностью. Эти параметры называются оценками.

Экспериментальный статистический материал для придания ему наглядности представляется в виде статистического ряда.

Весь диапазон полученных значений наработок до отказов (t_p) разбивается на интервал Δt_p .

Примерная величина интервала определяется по функции

$$\Delta t_p = \frac{t_{p\text{max}} - t_{p\text{min}}}{1 + 3,3 \lg n}. \quad (4.6)$$

где $t_{p\max}$ – максимальная наработка до отказа; $t_{p\min}$ – минимальная наработка между отказами; n – число отказов.

Если при выбранных равных интервалах количество значений случайной величины меньше 5, интервалы увеличиваются.

Для каждого интервала подсчитываются:

n_i – количество значений случайной величины, попавших в интервал;

$\frac{n_i}{n}$ – частота попаданий;

$\sum \frac{n_i}{n}$ – накопленная частота;

$\frac{n_i}{n \cdot \Delta t}$ – эмпирическая плотность вероятности.

Накопленная частота для всех интервалов должна быть равна единице, что служит проверкой правильности вычислений частоты для каждого интервала.

Результаты расчетов предоставляются в виде табл. (4.1).

Таблица 4.1

Интервалы	n_i ($\sum n_i = n$)	$\frac{n_i}{n}$	$\sum \frac{n_i}{n}$	$\frac{n_i}{n \cdot \Delta t} = f(t)$
-----------	-----------------------------	-----------------	----------------------	---------------------------------------

На основании данных табл. 4.1 находят основные числовые характеристики случайной величины – статистическую среднюю m_{cp} и статистическую дисперсию D_{cp} :

$$m_{cp} = \sum_{i=1}^k t_{pi} \frac{n_i}{n}, \quad (4.7)$$

где t_{pi} – представитель i -го интервала (его середина); k – число интервалов,

$$D_{cp} = \sum_{i=1}^k (t_{pi} - m_{cp})^2 \cdot \frac{n_i}{n}. \quad (4.8)$$

Полученное статистическое значение m_{cp} является оценкой наработки на отказ, определяемой по формуле

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{n}.$$

По данным табл. 4.1 строится гистограмма значений $\frac{n_i}{n\Delta t}$ от t_p (рис. 4.1).

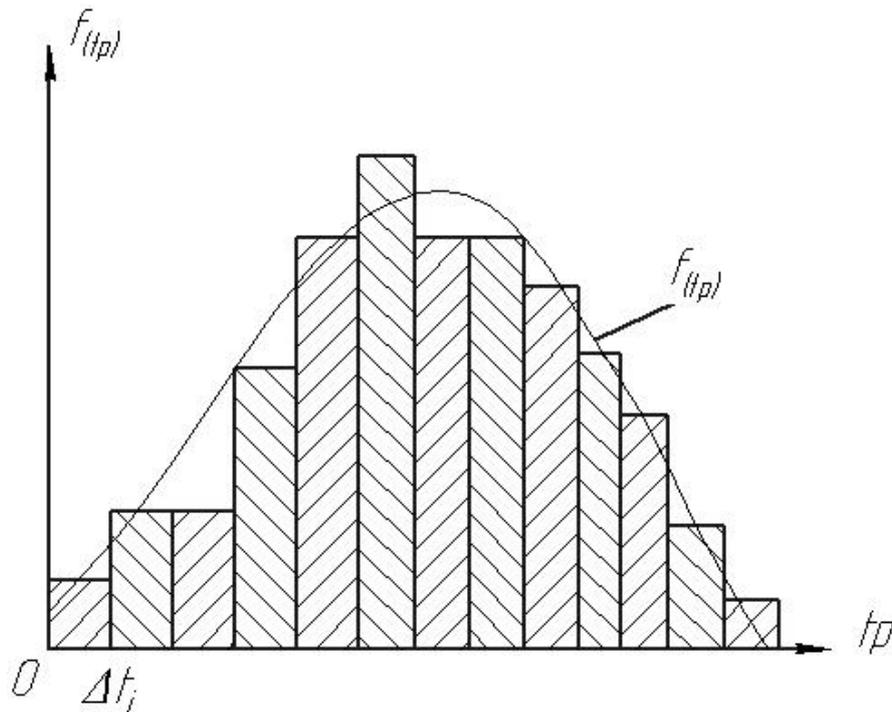


Рис.4.1. Гистограмма распределения отказов. График значений плотности вероятности $f(t_p)$ от времени t_p

Для построения гистограммы по оси абсцисс откладываются интервалы Δt_p и на каждом из интервалов строится прямоугольник с площадью, равной частоте появления случайной величины в данном интервале. Высоты прямоугольников пропорциональны соответствующим частотам и равны эмпирической плотности вероятности $\frac{n_i}{n\Delta t_p}$ для каждого интервала.

По гистограмме проводится выравнивающая кривая распределения, представляющая собой график функции $f(t_p)$.

При подборе теоретической кривой распределения между нею и статистическим распределением неизбежны некоторые расхождения. При этом необходимо знать, являются ли эти расхождения случайны-

ми, зависящими от ограниченного количества опытов или они являются существенными и связаны с тем, что данная кривая плохо выравнивает статистическое распределение.

Установить это возможно с помощью критерия хи-квадрат χ^2 , называемым критерием согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (4.9)$$

где k – число интервалов статистического распределения; n_i – количество значений случайной величины в каждом интервале; n – общее число наблюдений случайной величины; p_i – теоретическая вероятность попадания случайной величины в i -й интервал. Они численно равны приращению функции распределения на интервале:

$$P(t_{pi} < t_p < t_{pi+1}) = F_{t_{pi+1}} - F_{t_{pi}}. \quad (4.10)$$

Распределение χ^2 зависит от параметра r , называемого числом «степеней свободы». Оно равно числу интервалов k за вычетом числа независимых связей s , наложенных на частоты $\frac{n_i}{n}$:

$$r = k - s. \quad (4.11)$$

Таковыми связями являются среднее статистическое значение случайной величины m и статистическая дисперсия D .

Для определения χ^2 имеется специальная таблица [4], пользуясь которой можно определить вероятность p того, что распределенная по закону χ^2 превзойдет эти значения. Если вероятность больше 0,05, то экспериментальные данные соответствуют принятому теоретическому закону.

Пример 1

В результате хронометражных наблюдений получено 205 случайных значений наработок безотказной работы изделия $t_{р. час}$, приведенные в виде статического ряда:

1	8	15	23	33	44	61	78	106	106	311
2	8	16	24	33	45	61	79	108	108	322
3	8	16	24	34	45	61	79	112	112	343
3	8	17	24	35	46	64	79	114	114	361
4	9	18	25	35	47	65	80	114	114	370
4	9	18	26	35	47	65	82	118	118	

5	9	18	26	36	47	66	84	119	119
5	9	18	27	37	48	67	84	121	121
5	10	19	27	38	48	67	86	132	132
6	11	19	27	38	49	68	88	138	138
6	12	20	28	39	50	70	88	141	141
6	12	20	29	40	51	70	90	143	143
6	12	20	29	40	52	72	91	147	138
6	13	20	29	41	52	74	93	149	141
7	13	20	29	42	53	74	93	150	143
7	14	20	30	42	55	74	95	159	147
7	14	20	30	42	56	76	97	162	149
7	14	21	30	43	56	76	98	164	150
8	14	21	30	43	60	77	99	172	159
8	15	22	31	44		77	99	175	162
			31						164
									172
									175

Диапазон полученных значений ($n = 205$) случайных величин t_p разбивается на интервалы. Примерная величина интервала определяется по формуле

$$\Delta t_p = \frac{t_{p \max} - t_{p \min}}{1 + 3,3 \lg n}.$$

Если при равных интервалах, полученных по приведенной выше формуле, количество значений наработки оказывается меньше 5, принимаются увеличенные интервалы различной длины.

Для каждого интервала подсчитываются n_i ; $\frac{n_i}{n}$; $\sum \frac{n_i}{n}$; $\frac{n_i}{n \cdot \Delta t_p}$ и сводятся в табл. 1.

Таблица 1

Интервал Δt_p , ч	n_i ($\sum n_i = 205$)	$\frac{n_i}{n}$	$\sum \frac{n_i}{n}$	$\frac{n_i}{n \cdot \Delta t_p} = f(t)$
0–10	29	0,1415	0,1415	0,01415
10–20	28	0,1366	0,2781	0,01366
20–30	21	0,1024	0,3805	0,01024
30–50	34	0,1658	0,5463	0,00829
50–80	33	0,1610	0,7073	0,00537
30–110	17	0,0829	0,7902	0,00276
110–150	13	0,0634	0,8536	0,00159
150–190	11	0,0537	0,9073	0,00134
190–250	11	0,0537	0,9610	0,00097
250–370	8	0,0390	1,000	0,00032

На основании табл. 1 находится статистическое среднее m_{cp} и статистическую дисперсию D_{cp} :

$$m_{cp} = \sum_{i=1}^k t_{pi} \cdot \frac{n_i}{n},$$

где t_{pi} – представитель i -го интервала (его середина); k – число интервалов;

$$m_{cp} = 5 \cdot 0,1415 + 15 \cdot 0,1366 + 25 \cdot 0,1024 + 40 \cdot 0,1610 + 95 \cdot 0,0829 + 130 \cdot 0,0634 + 170 \cdot 0,0537 + 220 \cdot 0,0537 + 310 \cdot 0,0390 = 74 \text{ ч};$$

$$D_{cp} = \sum_{i=1}^k (t_{pi} - m_{cp})^2 \frac{n_i}{n} = (5 - 74)^2 \cdot 0,1415 + (15 - 74)^2 \cdot 0,1366 + (25 - 74)^2 \cdot 0,1024 + (40 - 74)^2 \cdot 0,1658 + (65 - 74)^2 \cdot 0,1610 + (95 - 74)^2 \cdot 0,0829 + (130 - 74)^2 \cdot 0,0634 + (170 - 74)^2 \cdot 0,0537 + (220 - 74)^2 \cdot 0,0537 + (310 - 74)^2 \cdot 0,0396 = 5644.$$

Полученное статистическое $m_{cp} = 74$ ч является оценкой нара-

ботки изделия на отказ и определяется по формуле $T = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{n} = 74$ ч.

По данным табл. 1 строят гистограмму значений плотности вероятности от времени и выравнивающую кривую эксплуатационного закона распределения времени безотказной работы изделия.

По оси абсцисс откладывают интервалы t_p и на каждом из них строят прямоугольник с площадью, равной частоте появления случайной величине наработки в данном интервале. Высота прямоугольника пропорциональна соответствующим частотам и равна эмпирической плотности вероятности $\frac{n_i}{n \cdot \Delta t_p}$ для каждого интервала.

По характеру гистограммы предполагается экспоненциальный закон распределения наработок на отказ.

Среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_{tp} = \sqrt{D_{tp}} = \sqrt{5644} = 75(\text{ч}),$$

что соответствует коэффициенту вариации $V=1$, свидетельствующему экспоненциальному распределению случайных величин.

4.4. Определение доверительных интервалов для показателей надежности

В теории надежности важными числовыми характеристиками для горных машин являются математические ожидания: $M[T_o] = T_o$ – наработка до отказа; $M[T] = T$ – наработка на отказ; $M[T_b] = T_b$ – среднее время восстановления; $M[n] = n_{cp}$ – среднее число отказов за определенный период работы.

Вычисленные значения на основе статистических данных всегда имеют элемент случайности.

Чтобы иметь представление о точности значений необходимо указывать границы возможных погрешностей.

В математической статистике для оценки погрешностей используется понятие доверительного интервала и доверительной вероятности.

Доверительным называется интервал, который с вероятностью γ покрывает значение параметра распределения. Величина вероятности γ носит название доверительная вероятность. Она показывает меру достоверности полученной оценки.

Если в результате опытов получена оценка $M[T]$ и установлено, что разница между параметром $M[T]$ и его оценкой не превышает некоторого значения ε с вероятностью γ , т. е. $P\{M[T] - \varepsilon < M[T] < M[T] + \varepsilon\} = \gamma$, то интервал от $M[T] - \varepsilon$ до $M[T] + \varepsilon$ будет являться доверительным, а его границы – доверительными.

Если известен закон распределения случайной величины, то доверительные границы распределяются с учетом параметров распределения.

В тех случаях, когда закон распределения неизвестен, доверительные границы до оценки математического ожидания m находятся из выражений:

$$m_{\max} = m + t_{\gamma} \sqrt{\frac{\sigma}{n-1}} = m + t_{\gamma} \sqrt{\frac{D}{n-1}}; \quad (4.12)$$

$$m_{\min} = m - t_{\gamma} \sqrt{\frac{\sigma}{n-1}} = m - t_{\gamma} \sqrt{\frac{D}{n-1}}, \quad (4.13)$$

где $t_{\gamma} = \Phi^{-1}(\gamma)$ – функция, обратная функции Лапласа [4]. Для доверительных вероятностей 0,9 и 0,95 значения t_{γ} приведены в табличной форме [4].

Доверительные границы коэффициента готовности K_r вычисляются в зависимости от числа отказов и показателей надежности – наработки на отказ T и среднего времени восстановления T_B , определяя ошибку:

$$\sigma(K_r) = K_r^2 \frac{T_B}{T} \sqrt{\frac{2}{n}}. \quad (4.14)$$

Задаются степенью достоверности α и находят вспомогательную величину z_2 :

α	0,995	0,99	0,95	0,90	0,80	0,70
z_2	3,291	2,576	1,96	1,645	1,282	1,036

Нижняя доверительная граница K_r будет равна:

$$K_r^H = K_r - \sigma(K_r) \cdot z_2. \quad (4.15)$$

Верхняя граница

$$K_r^B = K_r + \sigma(K_r) \cdot z_2. \quad (4.16)$$

Эти значения пределов максимума и минимума позволяют исключить из общей массы значения наработок до отказа изделий как недостоверные.

4.5. Определение требуемого уровня надежности проектируемого изделия

Выбранный уровень надежности должен максимально соответствовать экономическим, социальным и техническим требованиям к проектируемому изделию. Основными экономическими требованиями являются: увеличение нагрузки на карьер открытых разработок, повышение производительности труда и снижение себестоимости добываемой продукции. Нагрузки на карьер зависят от эксплуатационной производительности и ремонтов, использования применяемого оборудования и машин.

На величину эксплуатационной производительности влияют горнотехнические условия карьера, конструктивные параметры и

уровень надежности техники, совершенство технологических схем, степень использования технических возможностей оборудования.

Выбор показателей надежности, с помощью которых наиболее полно можно учесть влияние агрегата на эксплуатационную производительность, является важной задачей проектировщиков. Необходимо выбрать такие показатели, которые наиболее полно отражают оценку надежности машин и комплексов конкретного типа. Остальные показатели играют второстепенную роль и являются вспомогательными.

Для выявления основной номенклатуры показателей надежности рассматривается модель функционирования машин для средних условий эксплуатации (рис. 4.1).

Строится график функции D – дохода от уровня надежности в течение заданного периода эксплуатации t . Очевидно, что если машина не будет отказывать в течение времени t_i то доход от ее использования будет $D_i = d_{\text{эч}} t_i$, где $d_{\text{эч}}$ – средний часовой доход от применения машины, руб/ч.

Но поскольку после некоторой наработки t_1 появится отказ и машину необходимо ремонтировать, то на ее восстановление требуются затраты r_1 и машина находится в ремонте время τ_1 . Убыток от неиспользования машины во время ремонта составит величину u_1 . Общий эффект от использования машины будет снижен. Следующий ремонт произойдет после восстановления работоспособности и наработки t_2 . При этом часть наработки, равная $t_2 - t_2''$ компенсирует затраты на проведение первого ремонта. Оставшаяся часть наработки t_2''' определит доход от использования машины.

Тогда фактический доход в первый период эксплуатации

$$D_{\text{ф1}} = D_1 - (r_1 + u_1); \quad (4.17)$$

в конце второго периода

$$D_{\text{ф2}} = D_1 + D_2' - (r_1 + r_2 + u_1 + u_2); \quad (4.18)$$

в конце третьего периода

$$D_{\text{ф3}} = D_1 + D_2' + D_3' - (r_1 + r_2 + r_3 + u_1 + u_2 + u_3), \quad (4.19)$$

где $D_1 = d_{\text{эч}} \cdot t_1$; $D_2' = d_{\text{эч}} \cdot t_2'$; $D_3' = d_{\text{эч}} \cdot t_3'$

Для оценки надежности машины надо знать, какое влияние на эффективность функционирования окажут экономические затраты и убытки от простоев и восстановлений.

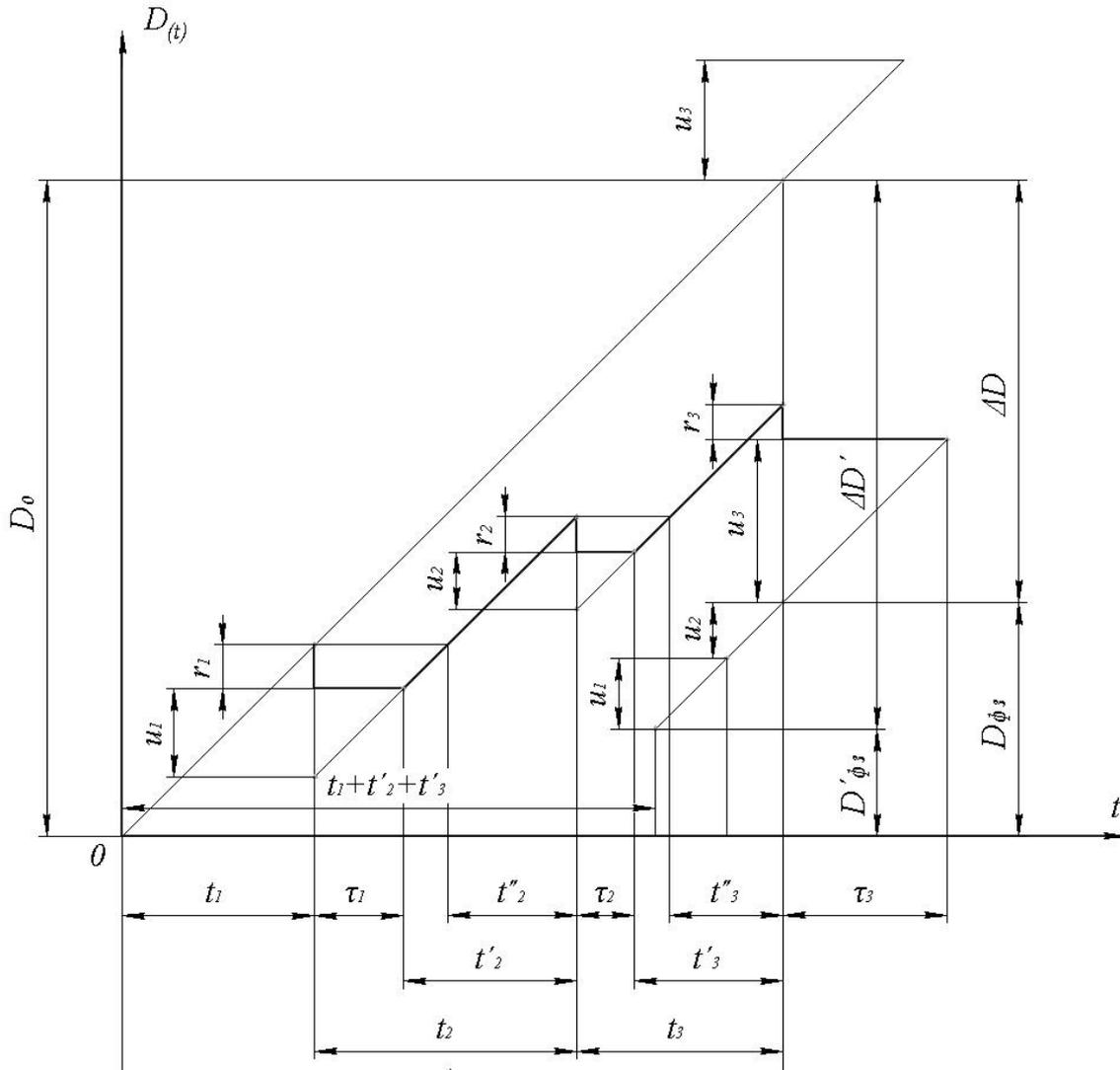


Рис. 4.2 Модель функционирования с доходами ремонтируемой системы: D_0 – доход от использования безотказной системы; D_{ϕ_3} , D'_{ϕ_3} – то же от ремонтируемой системы; $t_1, t_2, t_3, t'_2, t'_3, t''_2, t''_3$ – периоды наработки; r_1, r_2, r_3 – затраты на ремонт системы; u_1, u_2, u_3 – убытки от вынужденных простоев в ремонтах; ΔD и $\Delta D'$ – суммарные убытки от ремонтов и простоев системы

Эксплуатация большинства машин является цикличной, но периоды циклов различны.

Некоторые машины работают в одну смену, и между сменами имеется резерв времени для технического обслуживания и плановых ремонтов.

А в период организованных простоев имеется время на обнаружение и устранение постепенных отказов. Доминирующим фактором последствий отказов данных машин являются затраты на восстановление работоспособности.

И наоборот, отказ машин, работающих в жестком графике, приводит к большим убыткам в эксплуатации, поскольку приводит к простоям других машин, входящих в комплекс. Затраты на восстановление малы по сравнению с затратами от простоев.

Машины по уровню доминирующих факторов можно разделить на три группы.

К первой группе относят машины, эксплуатируемые до предельного состояния в прерывистом режиме, причем период их эксплуатации меньше или соизмерим с периодом ожидания работы.

Для этой группы машин показатели качества функционирования равны:

$$D_{\phi} = d_{\text{эч}} \sum_{i=1}^n t_i - \sum_{i=1}^n r_i. \quad (4.20)$$

Очевидно, сумма наработок до последнего отказа (предельного состояния) является ресурсом, а сумма затрат на ремонты определяет ее ремонтпригодность.

Ко второй группе относят машины, эксплуатируемые в режиме близком к непрерывному или в непрерывном, когда ремонты в период эксплуатации не предусматриваются.

Доминирующим фактором по оценке последствий отказа является вынужденный простой.

Для этой группы уравнение функционирования будет иметь вид

$$D_{\phi} = d_{\text{эч}} \sum_{i=1}^n t_i - \sum_{i=1}^n u_i. \quad (4.21)$$

Первый член уравнения определяет ресурс и наработку на отказ, второй член уравнения можно представить как $U_i = d_{\text{эч}} \cdot \tau_i$:

$$\frac{d_{\text{эч}}}{n} i = \sum_{i=1}^n \tau_i = d_{\text{эч}} \cdot \tau_{\text{в}}. \quad (4.22)$$

поэтому показатель ремонтпригодности – среднее время восстановления.

К третьей группе машин относят машины, эксплуатируемые до предельного состояния в прерывистом режиме, при этом период эксплуатации существенно превышает период ожидания работы.

Для этой группы машин отказы приводят к затратам на ремонт r_i и от простоев u_i . Эффект от эксплуатации определяют доходы в период использования машин в работе. Для этого случая

$$D_{\phi} = d_{\text{эч}} \sum_{i=1}^n t_i - \sum_{i=1}^n u_i - \sum_{i=1}^n r_i. \quad (4.23)$$

Первый и последний члены уравнения определяют ресурс, наработку на отказ, и среднюю суммарную стоимость ремонтов. Пользуясь выражениями (4.21), (4.22) можно определить среднее время восстановления и коэффициент готовности.

Для обоснования надежности сборочных единиц машин используются те же модели функционирования трех групп.

Для сборочных единиц первой группы рекламируется средний ресурс T_p , наработка на отказ T , средняя суммарная стоимость ремонтов. Для второй группы – ресурс T_p , наработка на отказ T , среднее время восстановления τ_v . Для сборочных единиц машин третьей группы – ресурс τ_p , наработка на отказ T , среднее время в восстановлении τ_v , суммарная стоимость ремонтов.

4.6. Структурный анализ надежности

Структурный анализ используют для раскрытия внутренних связей элементов и изделия в целом, установления закономерностей этих связей и возможностью управления ими для заданных целей.

При структурном анализе применяют структурные формулы и структурные схемы надежности машины и их сборочных единиц.

Перед расчетом надежности проводится работа по составлению логической схемы расчета. Она проводится в три этапа.

На первом этапе описывается работа изделия, рассматривается, как функционирует изделие, какой элемент, как и какую часть времени работает в общем времени работы машины. В результате составляется перечень свойств исправного изделия.

На втором этапе описываются возможные отказы всех элементов и изделия в целом. При этом формируется определение отказов, определяется степень влияния отказа каждого элемента на работоспособность всего изделия.

На третьем этапе составляется структурная (логическая) модель безотказной работы изделия. При этом различают два метода структурного анализа сборочных единиц изделия – логический и формализованный.

Логический метод используют в тех случаях, когда требуется определить все возможные сочетания появления предельного состояния сборочной единицы по критерию замены базовой детали.

Формализованный метод структурного анализа надежности используют как по критерию предельного состояния, так и по критерию отказа сборочной единицы. Определяется степень доступности каждой детали для ее разборки и замены.

Надежность изделия характеризуется не только надежностью, но и способом соединения его элементов: последовательным, параллельным и смешанным (табл. 4.2)

Из табл. 4.2 видно, что при последовательном соединении элементов отказ любого из них влечет отказ всего изделия. Если отказ каждого элемента является случайным независимым событием и известна вероятность безотказной работы каждого, то вероятность безотказной работы всего изделия будет равна произведению вероятностей составляющих его элементов:

$$P = P_A \cdot P_B \cdot P_C; \quad (4.24)$$

для m последовательно взаимодействующих элементов

$$P = \prod_{i=1}^m P_i. \quad (4.25)$$

Из представленных выражений следует, что при последовательном соединении надежность всего изделия всегда меньше надежности каждого из составляющих его элементов.

Если изделие состоит из параллельно соединенных элементов одинакового назначения, его работоспособность будет обеспечена при сохранении работоспособности хотя бы одного элемента. Вероятность безотказной работы такого изделия определяется по теореме вероятностей для совместных событий:

$$P_{(A+B+C)} = P_A + P_B + P_C - P_A \cdot P_B - P_B \cdot P_C - P_A \cdot P_C + P_A \cdot P_B \cdot P_C. \quad (4.26)$$

При большом количестве элементов формула получается громоздкой и часто удобнее определить вероятность отказа Q .

Вероятность отказа изделия от m параллельно соединенных элементов

$$Q = \prod_{i=1}^m q_i, \quad (4.27)$$

где $q_i = 1 - p_i$ – вероятность отказа i -го элемента.

А вероятность безотказной работы изделия:

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^m q_i = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i), \quad (4.28)$$

где $\prod_{i=1}^m$ – произведение.

Следовательно, вероятность безотказной работы изделия при параллельном соединении его элементов равна или больше надежности любого из её элементов.

При смешанном соединении и взаимодействии элементов надежность изделия определяется с использованием зависимостей для последовательного и параллельного соединения (табл. 4.3)

Таблица 4.3

Взаимодействие элементов	Логическая операция при расчете надежности	Алгебраический элемент логической операции
Последовательное	И P_a и P_b и P_c	$P_a \cdot P_b \cdot P_c$
Параллельное	Или или P_a или P_b или P_c	1) $P_a + P_b + P_c - P_a \cdot P_b - P_a \cdot P_c - P_b \cdot P_c + P_a \cdot P_b \cdot P_c$ 2) $1 - Q_A \cdot Q_B \cdot Q_C$ $Q = 1 - P$
Смешанное	И / или P_a и P_b или P_c	1) $P_a \cdot (P_b + P_c - P_b \cdot P_c)$ 2) $P_a \cdot (1 - Q_B \cdot Q_C)$

4.7. Резервирование

Резервирование – одно из средств повышения надежности машин и комплексов. Оно делится на три основных типа: структурное, временное и по параметру.

Структурное резервирование осуществляется введением в систему количественных резервных составляющих, избыточных по от-

ношению к необходимой минимальной структуре машин или комплекса, и выполняющих те же функции, что и основные.

При отказе одного из элементов резервный выполняет его функции, и работоспособность системы сохраняется.

Временное резервирование – это совокупность правил применения изделия и способ повышения его надежности, приводящих к возникновению у изделия избыточного времени.

Резервирование по параметру закладывается при проектировании изделия и предусматривает резерв работоспособности по пределу прочности, усталости, износостойкости. Основным считается структурное, постоянное резервирование, когда резервные элементы подключают параллельно основным. Очевидно, что система откажет, если будет иметь место отказ всех, в том числе и резервных, элементов.

Вероятность отказа по теореме умножения элементов для всей системы равна:

$$Q_{c(t)} = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n = \prod_{i=1}^n Q_{i(t)}, \quad (4.29)$$

где $Q_{c(t)}$ – вероятность отказа i -го элемента; n – число элементов в системе.

Вероятность безотказной работы

$$P_{c(t)} = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - p_i(t)]. \quad (4.30)$$

При резервировании становится возможным создание надежных систем из ненадежных элементов. При равнонадежных элементах

$$Q_{c(t)} = Q_{(t)}^n. \quad (4.31)$$

При резервировании замещением резервные элементы включаются только при отказе основных. Оно производится автоматически или вручную. Такое резервирование называют также активным.

Резервирование переключением на запасной элемент более эффективно, чем постоянное, так как резервный элемент сохраняет свою работоспособность к моменту его включения в работу. Но при этом необходимо устанавливать датчики контроля состояния основного элемента и механизмов включения.

Резервирование замещением применяют, когда возможно хотя бы кратковременная остановка работы системы. Схема резервирования замещением приведена на рис. 4.3

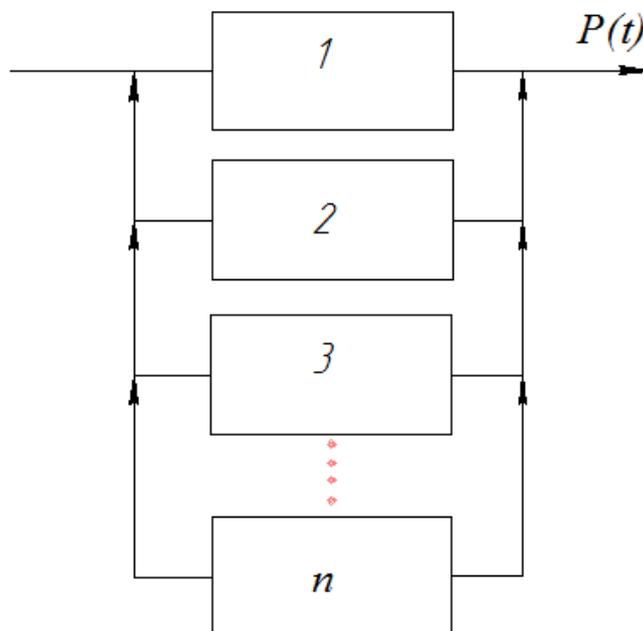


Рис. 4.3. Схема резервирования замещением элементов

Следующий метод резервирования заключается в постоянном подключении резервных элементов, работающих в облегченном режиме до отказа основных элементов. Тогда

$$P_{c(t)} = 1 - \frac{Q_{(t)} + Q'_{(t)}}{2}, \quad (4.32)$$

где $Q_{(t)}$ –вероятность отказа основного элемента; $Q'_{(t)}$ –вероятность отказа резервного элемента, работающего в облегченном режиме.

Общее резервирование системы означает, что при отказе любого элемента включается резервная цепь. При отказе машин в комплексе включается в работу исправная резервная машина или цепь машин.

Схема общего резервирования имеет вид, представленный на рис. 4.4.

Резервирование системы можно решить общим резервированием и отдельным.

При общем резервировании: пусть имеется m сетей, из них $(m - 1)$ являются резервными.

$P_{i(t)}$ – вероятность безотказной работы одного элемента в цепи, а $P_{c(t)}$ – вероятность безотказной работы цепи из n элементов.

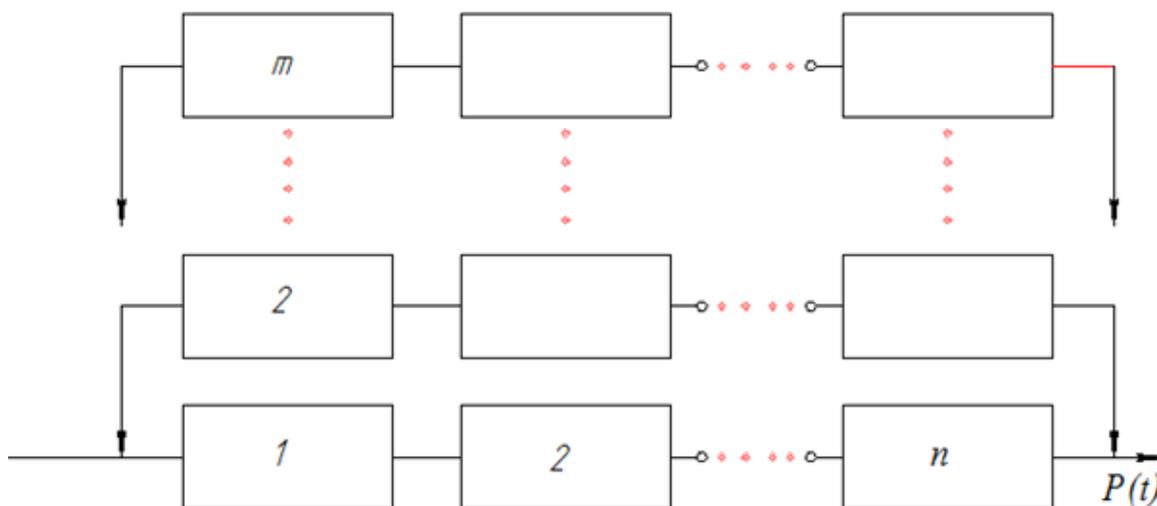


Рис. 4.4 Схема общего резервирования систем

Надежность всей системы при этом определяется по формуле

$$Q_{c(t)} = \prod_{j=1}^m Q_{j(t)} \quad \text{или} \quad P_{c(t)} = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_{j(t)}]. \quad (4.33)$$

Произведя подстановки, получим

$$P_{c(t)} = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - \prod_{i=1}^n P_{i(t)}]. \quad (4.34)$$

При равнонадежных элементах формула надежности системы будет иметь вид

$$P_{c(t)} = 1 - [1 - P^n(t)]^m. \quad (4.35)$$

При отдельном резервировании обеспечивается возможность включения в систему резервного элемента при отказе любого основного в условиях нагруженного резерва (рис. 4.5).

Каждый из m включенных в цепь элементов имеет $(m - 1)$ резервных, которые поочередно подключаются при отказе работающих.

Рассмотрим i -й элемент из $(m - 1)$ резервных:

$$Q_{j(t)} = \prod_{j=1}^m Q_{ij(t)}, \quad (4.36)$$

где $Q_{j(t)}$ – вероятность отказа элементов в системе;

$$P_{j(t)} = 1 - Q_{j(t)} = 1 - \prod_{j=1}^m Q_{ij(t)}. \quad (4.37)$$

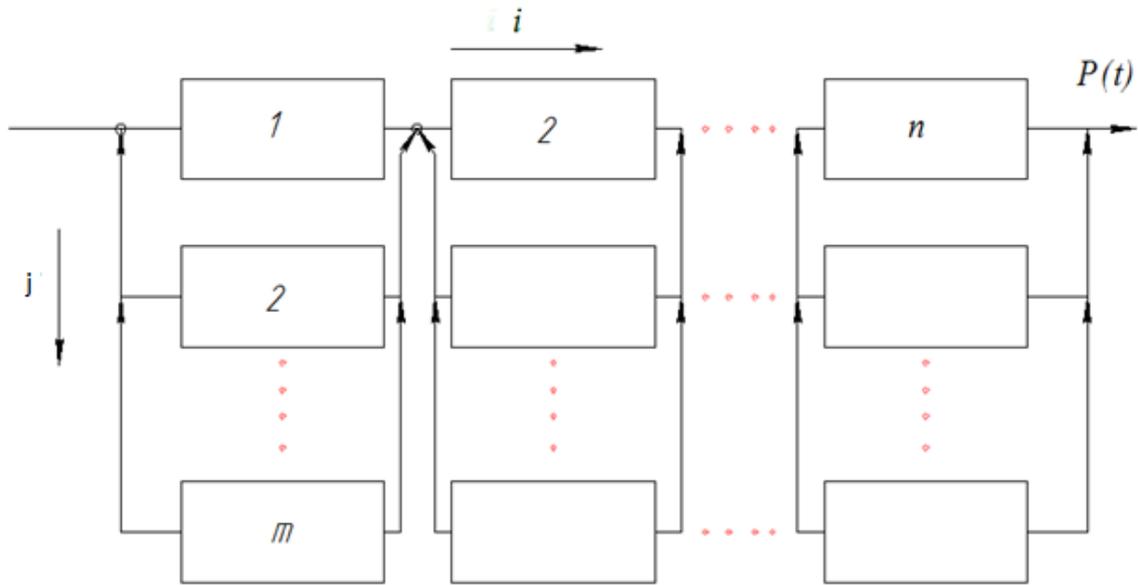


Рис. 4.5 Схема раздельного резервирования

Тогда вероятность безотказной работы системы с раздельным резервированием будет:

$$P_{c(t)} = \prod_{i=1}^n \{1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_{ij(t)}]\}, \quad (4.38)$$

а при равнонадежных элементах:

$$P_{c(t)} = \{1 - [1 - P_{(t)}]^m\}^n. \quad (4.39)$$

Раздельное резервирование усложняет конструкцию системы, поэтому его применяют только для наиболее ответственных элементов. При раздельном резервировании надежность системы выше.

Если для нормальной работы изделия необходимо работоспособное состояние n элементов из m параллельно взаимодействующих, то $m - n$ элементов являются резервными. Кратность резервирования h находится из соотношения $h = (m - n) / n$. На схеме рис. 4.6 представлены методы и способы резервирования.

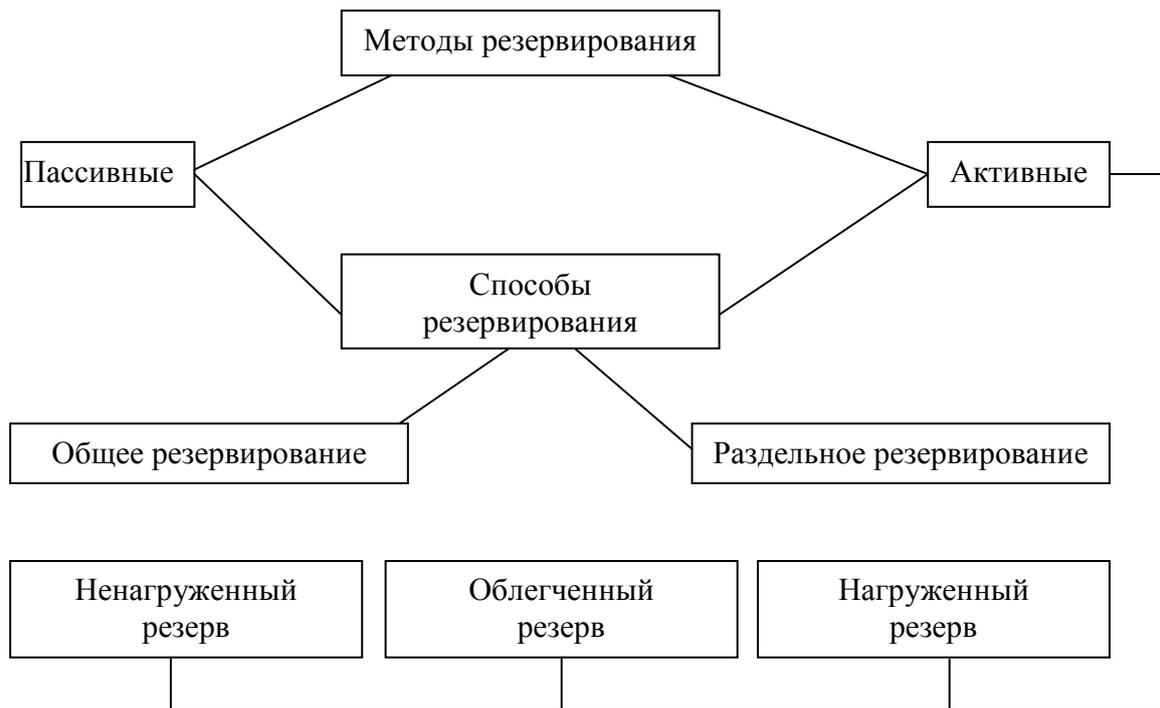


Рис. 4.6 Методы и способы резервирования

Пример 1

Для повышения надежности системы регулирования прибор с вероятностью безотказной работы $P_{(t)} = 0,90$ дублируется другими такими же приборами.

Сколько нужно резервировать приборов, чтобы надежность системы была не ниже 0,995.

Решение

Для схемы постоянного резервирования с нагруженным резервом и равнонадежными элементами

$$P_m = P_{c(t)} = 1 - [1 - P_{(t)}]^n,$$

тогда

$$n \geq \frac{\ln[1 - P_{c(t)}]}{\ln[1 - P_{i(t)}]} = \frac{\ln(1 - 0,995)}{\ln(1 - 0,90)} = \frac{\ln 0,005}{\ln 0,1} = 2,3.$$

Принимаем три прибора.

Пример 2

Найти вероятность безотказной работы системы, состоящей из 4 элементов для случаев:

1) последовательного соединения (рис. 4.7, а);

- 2) параллельного соединения элементов (рис. 4.7 б);
- 3) резервирование одного их элементов (рис. 4.7 в);
- 4) общего резервирования системы (рис. 4.7 г);
- 5) раздельного резервирования системы (рис. 4.7 д).

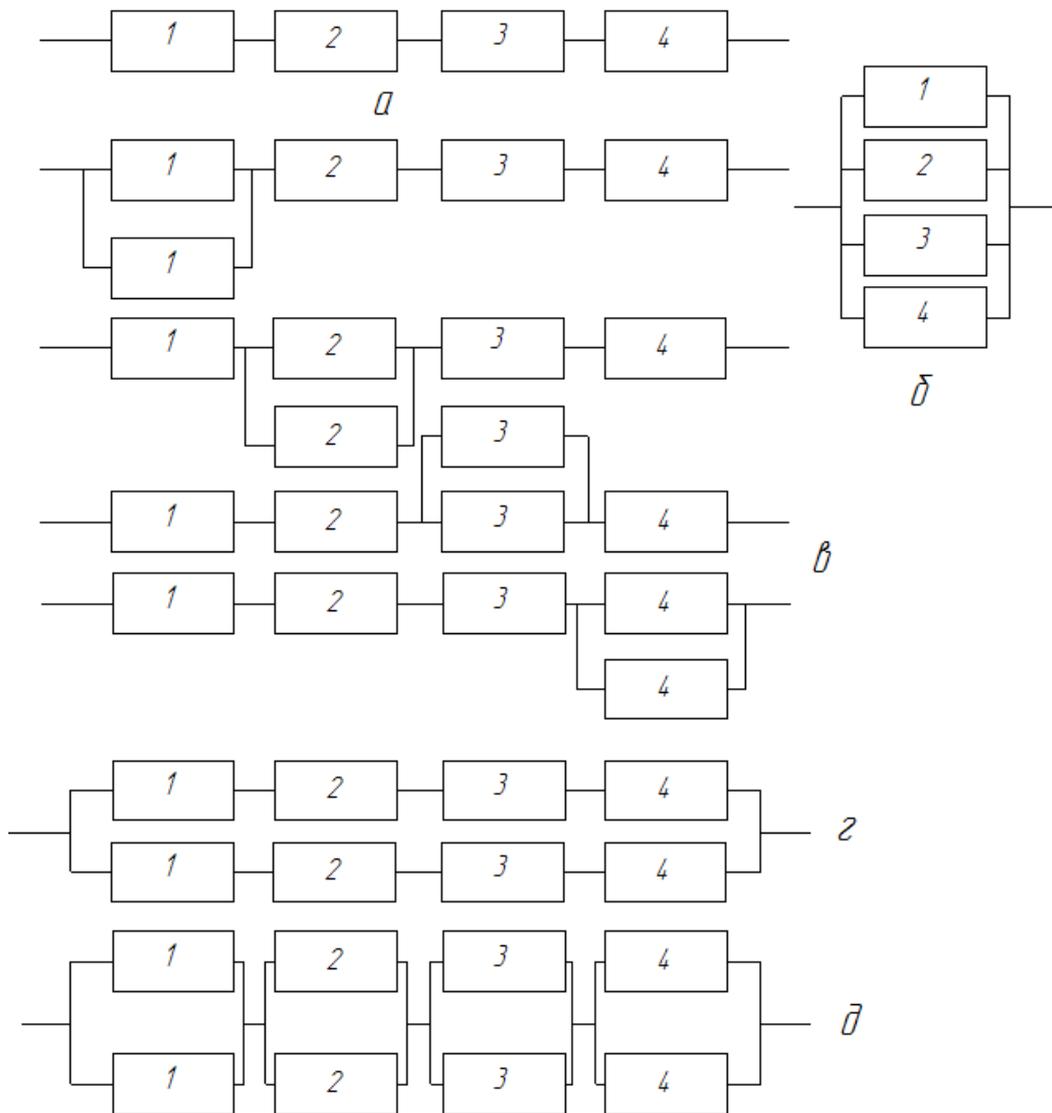


Рис. 4.7 Варианты соединения элементов в системе

Вероятность безотказной работы элементов для заданной наработки $P_1 = 0,9$; $P_2 = 0,8$; $P_3 = 0,7$; $P_4 = 0,6$.

Решение

$$1) P_c = \prod_{i=1}^4 P_i = 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,6 = 0,302 ;$$

$$2) P_c = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - p_i) = 1 - (1 - 0,9) \cdot (1 - 0,8) \cdot (1 - 0,7) \cdot (1 - 0,6) = 0,948 ;$$

3) резервирование первого элемента

$$P_c = [1 - (1 - P_1)^2] \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = [1 - (1 - 0,9)^2] \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,6 = 0,326;$$

резервирование второго элемента

$$P_c = P_1 [1 - (1 - P_2)^2] \cdot P_3 \cdot P_4 = 0,9 [1 - (1 - 0,8)^2] \cdot 0,7 \cdot 0,6 = 0,363;$$

резервирование третьего элемента

$$P_c = P_1 \cdot P_2 [1 - (1 - P_3)^2] \cdot P_4 = 0,9 \cdot 0,8 [1 - (1 - 0,7)^2] \cdot 0,6 = 0,393;$$

резервирование четвертого элемента

$$P_c = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 [1 - (1 - P_4)^2] = 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,7 [1 - (1 - 0,6)^2] = 0,423;$$

$$4) P_c = \prod_{i=1}^2 (1 - \prod_{i=1}^4 P_i) = 1 - (1 - 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,6)^2 = 0,513;$$

$$5) P_c = \prod_{i=1}^4 [1 - (1 - P_i)^2] = [1 - (1 - 0,9)^2] \cdot [1 - (1 - 0,8)^2] \cdot [1 - (1 - 0,7)^2] \times \\ \times [1 - (1 - 0,6)^2] = 0,726.$$

4.8. Основные способы повышения надежности машин при проектировании

При проектировании конструктор должен иметь информацию о современных методах создания или модернизации машин не только в горной отрасли, но и в общем машиностроении. Из этой информации он использует наиболее прогрессивные конструктивные решения, обеспечивающие наиболее рациональные рабочие процессы машин. Ниже приведены основные способы повышения надежности машин при проектировании:

Применение бесступенчатого регулирования за счет использования гидро-, пневмо- и электроприборов. Введение элементов автоматизации, предохраняющих элементы машин от перегрузок. Применение централизованных смазочных систем, регулировок для компенсации износа быстроизнашивающихся деталей.

Внедрение в разработки высоконадежных элементов, проверенных в заданных режимах работы, стандартизированных и унифицированных.

Использование материалов с высокими и стабильными характеристиками по прочности, выносливости, усталости, износу, методов упрочнения деталей. Эти методы также повышают прочность, износостойкость, коррозионную стойкость, жаропрочность.

Применение конструкций и материалов с высокой и оптимальной жесткостью. Жесткость влияет на вероятность разрушения деталей и конструкций по критериям статической и усталостной прочности, на виброустойчивость. При этом следует в конструкции исключать элементы большой податливости, применять детали, работающие на растяжение и сжатие, а не на изгиб и скручивание, выбирать рациональные формы сечения деталей, уменьшать местные деформации, создавать предварительный натяг в конструкциях.

Обеспечение предохранения изделий и их элементов от вредных воздействий (ударные нагрузки, вибрации, запыленность, влажность, низкие и высокие температуры и др.), упрощение сборки машины, ее агрегатов и узлов. Исключение индивидуального подбора и подгонки деталей, обеспечение их полной взаимозаменяемости.

Рациональная компоновка оборудования, доступность и удобство для осмотра, регулирования, обслуживания.

Кроме этого, необходимо упростить правила эксплуатации, планировать блокировки при неправильном действии обслуживающего персонала, снизить объемы и трудоемкость технического обслуживания. Повышать надежность путем резервирования как по количеству так и по параметру, проведением ускоренных испытаний на надежность экспериментальных узлов и применением современных методов расчета конструкции на прочность, выносливость, износостойкость.

4.9. Основные требования и методология расчета показателей надежности узлов машин

Требования к ресурсам деталей

Требования разрабатываются с учетом расположения каждой детали в структурной схеме узла, влияния отказа детали на уровень ремонтпригодности машин.

Когда деталь расположена в структурной схеме узла последовательно, наработка ее до замены должна быть не менее наработки до замены всего узла, т. е.

$$T_j = T_i \text{ при } R_j = P_i, \quad (4.40)$$

где T_j ; T_i – наработки машины до замены j -й детали, i -го узла; R_j ; R_i – ранг затрат (средние ремонтные затраты) на замену j -й детали i -го узла при ремонте, определяемый степенью доступности и легкоосъемности.

В том случае, когда затраты на подготовительно заключительные операции по замене узла превышают норматив текущего ремонта или равны ему, ни одна деталь этого узла не должна иметь ресурс меньше ресурса самого узла до его замены.

Если эти затраты меньше нормативов текущего ремонта, то детали, расположенные параллельно в структурной схеме узла, могут быть заменены при новом текущем ремонте.

Средний ресурс детали до замены будет

$$T_{p.cpi} = T_j \cdot K_j \cdot K_i, \quad (4.41)$$

где K_j и K_i – коэффициенты использования детали в работе узла и использования узла в рабочих и вспомогательных операциях машины.

Требования к показателям ремонтпригодности сборочных единиц

Данные требования формируются при проведении структурного анализа надежности машины на этапе разработки технического задания на проектирование. Они обоснованы критериями предельного состояния машины. В последующем требования уточняются с учетом комплексных показателей надежности машины – коэффициентов готовности K_r и технического использования $K_{ти}$.

Коэффициент готовности обычно принимается равным $0,9 \div 0,99$. Тогда средняя оперативная продолжительность восстановления τ_{Σ} после отказов,

$$0,1T_{p.cp} \geq \tau_{\Sigma} \geq 0,01T_{p.cp}, \quad (4.42)$$

где $T_{p.cp}$ – средний ресурс машины.

А при $K_{ти} = 0,8 \div 0,95$ средняя объединенная оперативная продолжительность ремонтов и техобслуживаний будет равна:

$$0,20T_{p.cp} \geq \tau_{об} \geq 0,05T_{p.cp}. \quad (4.43)$$

Разность этих выражений (4.43) и (4.42) есть величина средней оперативной продолжительности плановых ремонтов и техобслуживаний.

Таким образом, с помощью структурного анализа на этапе проектирования можно обосновать основные показатели ремонтпригодности машины. Коэффициенты доступности и помех сборочной единицы могут быть получены с помощью матрицы:

$$K_{di} = \frac{N_1}{M_1}; K_{ni} = 1 = \frac{N_1}{M_1}, \quad (4.44)$$

где K_{di} – коэффициент доступности сборочной единицы; K_{ni} – коэффициент помех; N_1 – номер заменяемой детали в матрице узла; M_1 – общий массив деталей в матрице узла.

Методология расчета безотказности узлов

Расчет показателей безотказности возможен, если известны функциональная схема машины узла и сведения о работоспособности их составных частей. При этом определяется вероятность безотказной работы в течение определенной наработки. Узел может находиться только в двух состояниях – работоспособном или неработоспособном. Каждая деталь узла может находиться только в этих двух состояниях. Но может быть несколько вариантов неработоспособного состояния в зависимости от числа видов отказов деталей и их влияния на функциональные возможности узла.

Цель расчета безотказности:

- определить, достижима ли требуемая надежность при выбранной конструкции и технологии;
- распределить значения показателей безотказности по составным частям узла;
- сравнить различные варианты конструкции по надежности;
- выяснить необходимость и возможность резервирования различных видов.

В горном машиностроении в основном проектируются механические системы и машины, в которых не известны их характеристики. Поэтому в начале выбирается модель функционирования системы.

Модель должна учитывать надежность в зависимости от основных определяющих факторов и быть по возможности не сложной, учитывать связь нагрузок с состоянием системы.

Для вновь проектируемых механических систем нельзя рассчитать показатели надежности пока не будет известно конструктивное оформление узла и его элементов (зубчатых колес, валов и т. д.). Для оценки

надежности новых узлов и устройств необходимы лабораторные испытания составных элементов и стендовые испытания узлов и агрегатов. Второй путь получения оценок надежности при проектировании – расчет элементов системы с учетом вероятностных распределений внешних нагрузок и несущей способности элементов. Но почти всегда в конструкции появляются детали, размеры которых не могут быть увеличены вследствие ряда ограничений. Эти детали и лимитируют надежность узла, и вероятностные расчеты следует начинать с них. Резервирование данных элементов следует производить по параметру.

Методы определения расчетных нагрузок по показателям долговечности

Расчетные нагрузки, принимаемые по критерию прочности конструкций или устойчивости, имеют статистическую природу. Если заданы показатели долговечности, то одним из признаков их предельного состояния является разрушение узлов или опрокидывание вследствие перегрузок. Перегрузка машины при ее нормальной эксплуатации может появиться, когда машина используется в предельном режиме ее технической характеристики. Всякая дополнительная нагрузка при этом приводит к статической перегрузке машины. Уровень и частота появления перезагрузок различны. Однако достаточно одной перегрузки, превышающей запас прочности, чтобы машина достигала своего предельного состояния.

Вероятность достижения такого признака предельного состояния за заданный период можно определить на стадии проектирования путем вычисления всех случаев работы машины на предельном режиме, допустимой технической характеристикой машины.

Общее число случаев появления предельной нагрузки принимают по режиму эксплуатации новой машины:

$$N_{(T_{p.ср})} = n_{ц} \cdot m \cdot T_{p.ср}, \quad (4.45)$$

где $T_{p.ср}$ – средний ресурс машины; $n_{ц}$ – среднее число появлений предельной нагрузки за время технологического цикла машины; m – среднее число технологических циклов за единицу времени.

Появление хотя бы одной перегрузки определяется по формуле

$$P_{(Q_p)} = \frac{1}{N_{(T_{p.ср})}}, \quad (4.46)$$

где Q_p – искомое значение расчетной перегрузки.

Коэффициент перегрузки по условию неразрушения принимается с учетом неравенства:

$$f(K_{п}) < P_{(Q_p)}, \quad (4.47)$$

где $K_{п} = \frac{Q_p}{Q_n}$ – отношение расчетной предельной нагрузки к ее номинальному значению; $f(K_{п})$ – расчетная, допустимая, частота появления предельной перегрузки.

Поскольку предельная перегрузка имеет статистическое распределение, то частота ее появления зависит от закона распределения, и частоты модального Q_m появления нагрузки.

Обеспечение заданного ресурса по критерию прочности

При всем разнообразии деталей, используемых в механических, гидромеханических, пневмомеханических и электромеханических передачах вероятностный расчет прочности целесообразно выполнять для деталей, определяющих размеры трансмиссий. Обычно идет проверка при ограничении конструкции по размерам и массе.

Для обоснования использования вероятностных расчетов прочности учитывают изменчивость параметров деталей или конструкции от механических характеристик материалов, возможность отклонения площадей, опасных сечений и т. д. Характеристики прочности могут быть неслучайными и случайными. Например, изменчивость свойств конструкционных материалов может быть для стали $\gamma = 0,02 \div 0,06$, для алюминиевых сплавов $\gamma = 0,014 \div 0,070$; где γ – коэффициент вариации. Если характеристики прочности изменяются случайным образом, то необходимы вероятностные расчеты.

Большими запасами прочности являются такие, при которых соблюдается условие

$$\bar{R} - \bar{S} \gg (\sigma_R + \sigma_S), \quad (4.48)$$

где \bar{R} и \bar{S} – выборочные средние отклонения совокупного параметра прочности нагрузок и напряжений; σ_R и σ_S – выборочные среднеквадратичные отклонения совокупного параметра прочности и нагрузки.

При детерминированных расчетах рассматриваются следующие два вида отказов по критериям прочности.

1. Мгновенное разрушение детали в опасном сечении из-за превышения нагрузкой предела прочности.

2. Постепенное накопление повреждения, приводящего к зарождению и накоплению микротрещин и последующему разрушению конструкции. Напряжения при этом превышают пределы выносливости материала.

Для обеспечения заданного ресурса при отказах первого вида расчеты на прочность ведут при фиксированных нагрузках с определением запаса прочности или коэффициента безопасности:

$$n_{\sigma} = \frac{[\sigma]}{\sigma}; \quad n_{\tau} = \frac{[\tau]}{\tau}; \quad k = \frac{Q_p}{Q_d}, \quad (4.49)$$

где n_{σ} ; n_{τ} – коэффициенты запаса прочности; $[\sigma]$ и $[\tau]$ – допустимые нормальное и касательное напряжения; σ и τ – расчетные напряжения; k – коэффициент безопасности; Q_p и Q_d – расчетная и действительная нагрузки.

При отказах второго вида расчет ведут на усталость при регулярной переменной нагрузке:

$$n_s = \frac{S_{1d}}{S_a + \psi_{\sigma d} \cdot S_m}, \quad (4.50)$$

где n_s – коэффициент запаса; S_{1d} – предел выносливости детали; S_a и S_m – амплитуда и среднее значение цикла переменной нагрузки; $\psi_{\sigma d}$ – коэффициент влияния асимметрии цикла детали.

При вероятностных расчетах рассматривают три вида ресурсных отказов деталей и конструкций по критерию прочности.

1. Статическое и повторно-статическое разрушение от приложения одного или нескольких десятков циклов нагружений.

2. Малоцикловые усталостные разрушения, которые происходят от приложения N циклов нагружений от 10^2 до 10^5 .

3. Многоцикловые усталостные разрушения, которые происходят при числе циклов $N > 10^5 \div 10^8$.

В соответствии с видами отказов ведутся свои расчеты на долговечность.

Расчет надежности изнашиваемых устройств при проектировании

Отказы из-за износа в современных машинах могут достигать 80÷90 % общего количества отказов [6]. Они возникают при износе поверхности до предельного состояния при значительном изменении коэффициента трения, уменьшения или резкого увеличения, вплоть до схватывания и заедания в фрикционной паре. Явления, происходящие в парах трения, влияют на безотказность и долговечность сопряженных деталей.

Трение и изнашивание зависит от многих факторов: состояния изнашиваемых поверхностей, наличия смазочного материала или другой промежуточной среды, нагрузок (давлений), характера взаимных перемещений (скорость, амплитуда перемещения, фиксация перемещений и т. д.), допустимого предела износа. Определяющими среди этих факторов являются – давление сопряженных трущихся поверхностей и скорость их относительного перемещения.

Состояние контактирующих поверхностей также является важной характеристикой развития изнашивания. Неоднородность макро- и микрогеометрии сопряженных поверхностей приводит к дискретному характеру фактического их контакта. Контакт происходит не по всей площади, а по отдельным пятнам контакта, образующими фрикционные связи.

Для прогнозирования надежности изнашиваемых устройств, требуется оценка безотказности и долговечности. Безотказность пары трения обеспечивается сохранением условий работы при расчетном коэффициенте трения. Для антифрикционных пар опасно только увеличение коэффициента трения, для фрикционных пар – как увеличение, так и уменьшение. Уменьшение происходит при попадании смазочного материала в зону трения. Следовательно, безотказность должна обеспечиваться защитой пар трения специальными устройствами.

Долговечность изнашиваемых пар обеспечивается наступлением предельного износа при наработке не менее расчетной.

Методика прогнозирования износа предусматривает последовательное определение:

- предельно допустимого износа;
- изменение износа в зависимости от наработки или интенсивности изнашивания и границ возможного рассеивания износа;
- пути трения до наступления износа;
- ресурса в единицах наработки.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

5.1. Технологические мероприятия и автоматизация производства

Технологические мероприятия являются не менее важными, чем конструкторские. К основным из них относят совершенствование технологии производства, автоматизация процесса производства, статистический контроль качества продукции, испытание элементов и машин в целом под нагрузкой.

При изготовлении деталей необходимы обеспечение стабильности их размеров и форм, повышение износостойкости и усталостной прочности, повышение и обеспечение параметров точности, качества обрабатываемых поверхностей и физико-механических свойств деталей, применение высококачественных и однородных материалов, прогрессивных технологических процессов сборки, монтажа и испытаний, строгое соблюдение технологических регламентов.

Существенную роль в повышении надежности и долговечности деталей играют обеспечение качества поверхностей деталей, глубина и степень наклепа, направления и величина остаточных напряжений, структура и текстура материала.

В технологический процесс изготовления включаются различные виды термообработки, механическое и химико-термическое упрочнение, нанесение покрытий, контроль качества и др. Важное значение имеет получение и качество заготовок, из которых делается деталь. Основными способами получения заготовок машин являются литье, ковка, штамповка, прокат и сварка. Каждый из этих способов разделяется на свой классификационный ряд в зависимости от уровня производства и требуемой точности заготовок.

Заготовки подвергаются обработке механической (точнее, фрезерование, протягивание, шлифование, полирование, пластическое деформирование и др.), химико-термической (цементация, азотирование, цианирование, сульфидирование и др.) поверхностной закалке (газовая наплавка, электродуговая, электрошлаковая и вибродуговая

наплавки и др.), напылению рабочих поверхностей металлом с другими свойствами (газовая, плазменная, электрометализация), нанесению на поверхности гальваническим способом (никелирование, хромирование, покрытие кобальтом и никель-кобальтом и др.).

Основными требованиями при технологии производства деталей и узлов являются минимизация затрат на изготовление и стоимость готовых изделий при обеспечении их параметров рабочей документации проектировщика.

Изготовление деталей из отливок широко применяются для формообразования деталей – как мелких, так и крупных. При этом используются следующие способы литья:

- в песчаные формы при ручной формовке;
- в песчаные формы при машинной формовке;
- в металлическую форму (в кокиль);
- центробежное литье;
- в оболочковые формы;
- по выплавляемой модели;
- штамповка деталей из жидкого металла;
- под давлением.

Объем последующей механической обработки в % от трудоемкости изготовления деталей колеблется от 5÷10 при отливках под давлением до 50 ÷ 80 при литье в песчаные формы. Целесообразность применения того или иного способа литья зависит от требуемого класса чистоты поверхности литья, припуска на механическую обработку и серийности изготовления отливок. Поковки получают ковкой в подкладных штампах и штамповкой в закрепленных штампах, либо специальными методами. Точность деталей получается 2÷5 класса.

Использование фасонного проката сокращает объем изготовления деталей резанием на 30÷40 %.

Способы сварки постоянно совершенствуются, и с ее помощью можно дешевле получать заготовки деталей вместо литья иковки.

При механической обработке деталей на обрабатываемой поверхности появляются риски, образующие шероховатость поверхности.

При сухом трении штрихи на поверхностях способствуют заданию или интенсивному износу трущихся поверхностей при их значительно удельном давлении друг на друга.

Упрочнение поверхностей полезно, в том числе для сопротивления усталостным разрушениям. Упрочнение поверхностей пластиче-

ским деформированием повышает предел выносливости гладких валов на 20÷40 %, подступочных частей валов и галтелей на 100 %, сварных швов в 2 раза, резьбы в 2÷3 раза.

Термическая и химико-термическая обработка повышает прочность и износостойкость деталей более чем в 2 раза. Цементация и закалка зубьев шестерен повышают изгибную прочность в 3 раза по сравнению с закалкой рабочей поверхности.

Износостойкие наплавки особенно эффективны для деталей, работающих в абразивной среде.

Азотирование и хромирование повышают износостойкость от 3 до 10 раз.

Важным средством повышения надежности чистовой обработки деталей является активный контроль, т. е. самонастройка станка для получения точных размеров изделий.

Для качественного выполнения технологических операций и для устранения ошибок от ручного труда применяется автоматизация производства.

5.2. Контроль качества выпускаемой продукции

На качество изделий, выпускаемых заводами, влияют многие факторы. Поставить все факторы под контроль невозможно.

Выпуск недоброкачественной продукции связан с ущербом для завода-изготовителя, (затраты труда и материалов для негодной продукции) и для потребителя (аварийные отказы и простои оборудования, затраты на ремонт).

Для проверки качества исходного сырья ставится входной контроль, для готовой продукции – приемочный контроль. Контроль ставится также после наиболее ответственных и тяжело поддающихся регулировке технологических операций. Этот контроль называется текущим.

Контроль может быть качественным и количественным.

При качественном контроле регистрируются численные значения параметров и отмечаются лишь категории, классы, к которым принадлежит проверяемое изделие.

При качественном контроле принимается одно из двух решений: пригодно изделие или оно бракованное и использованию не

подлежит. При качественном контроле применяют шаблон или автоматические измерительные устройства, которые делят изделия на годные и дефектные (т. е. входит по размерам деталь в пределы допуска или нет).

Качественный контроль не позволяет уловить тенденцию изменения технологического процесса или изменение параметров станка. Он регистрирует брак, но не предупреждает его. Поэтому он обязательно должен быть сплошным, контролю должны подвергаться все изделия.

Количественный контроль носит предупредительный характер. Для его производства используют контрольные карты, на которых в границах допуска наносятся предупредительные границы, вычисленные по статистическим характеристикам. При приближении числовых значений к предупредительной границе сигнализируется тенденция к ухудшению качества продукции (рис.5.1).

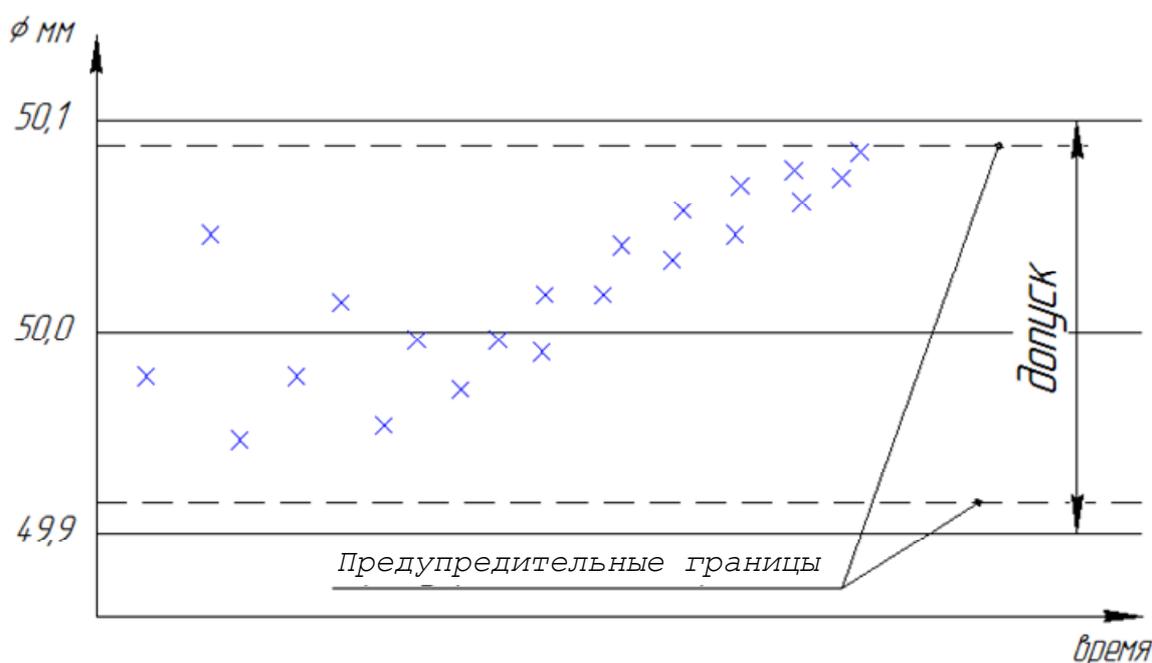


Рис. 5.1. Контрольная карта

При больших партиях количественный контроль из-за больших затрат сплошным не выполняется, а делается выборочным, проверяются отдельные изделия из партии. Поскольку выборочный контроль основан на математической статистике, его называют статистическим. Объем выборки определяется методами однократной выборки, двукратной выборки и последовательного анализа.

5.3. Испытания узлов и машин при их изготовлении

Испытания при серийном производстве машин

При производстве изделий машиностроительные заводы выпускают свою продукцию, изготавливаемую непосредственно на заводе для конструкций машин и покупают комплектующие изделия, изготавливаемые на других заводах или на заводах-смежниках. При серийном производстве проводятся испытания узлов и машин в целом на работоспособность, и отдельных, изготавливаемых заводом узлов на надежность. Испытания комплектующих изделий на надежность прошли на своих заводах-изготовителях. Схема испытаний серийных машин и их узлов представлена на рис. 5.2.



Рис. 5.2. Схема испытаний серийных машин

Испытания на работоспособность узлов машин при их серийном производстве проводятся на специальных стендах, оснащенных изме-

рительной аппаратурой и средствами нагружения узла в соответствии с его технической характеристикой по всем техническим параметрам. Узел испытывается на холостом ходу и при максимальной нагрузке. Результаты испытаний оформляются актом. Если параметры узла соответствуют паспортным показаниям, он направляется в сборку. Если не соответствует – на доработку.

Испытание модернизируемых узлов на надежность также выполняют на стендах ресурсных испытаний. Испытания проводят до предельного состояния. При этом фиксируются наработки до каждого отказа и между отказами, количество отказов, время восстановления каждого отказа. Нарботка узла до предельного состояния под нагрузкой определяет показатель его долговечности – ресурс узла, средняя наработка между отказами определяет показатель безотказности – наработку на отказ, а среднее время восстановления узла определит показатель его ремонтпригодности.

Все испытания проводятся по специальным программам – методикам, утверждаемым директором завода и согласованным с предприятием проектировщиком изделия.

Испытания серийно выпускаемых машин проводятся на полигоне завода-изготовителя под нагрузкой.

Фиксируются все параметры технической характеристики изделия. При положительных результатах, когда машина соответствует паспортным данным, составляется акт испытаний и машина направляется в сбыт.

Испытания опытных образцов изделий

Опытные образцы изделий являются собственностью заводоизготовителей, проходят различные этапы испытаний и продаются потребителю только после положительных результатов Государственных приемочных испытаний (рис. 5.3).

Первый этап испытаний – *заводские испытания опытного образца*. Они делятся на определительные и контрольные.

Определительные испытания изделий на надежность проводят для определения фактических показателей надежности. По их результатам определяется соответствие фактических показателей показателям, заложенным в техническом задании на разработку изделия. Только после испытания фактические показатели вносятся в техническую документацию на изделие, устанавливается группа надежности.

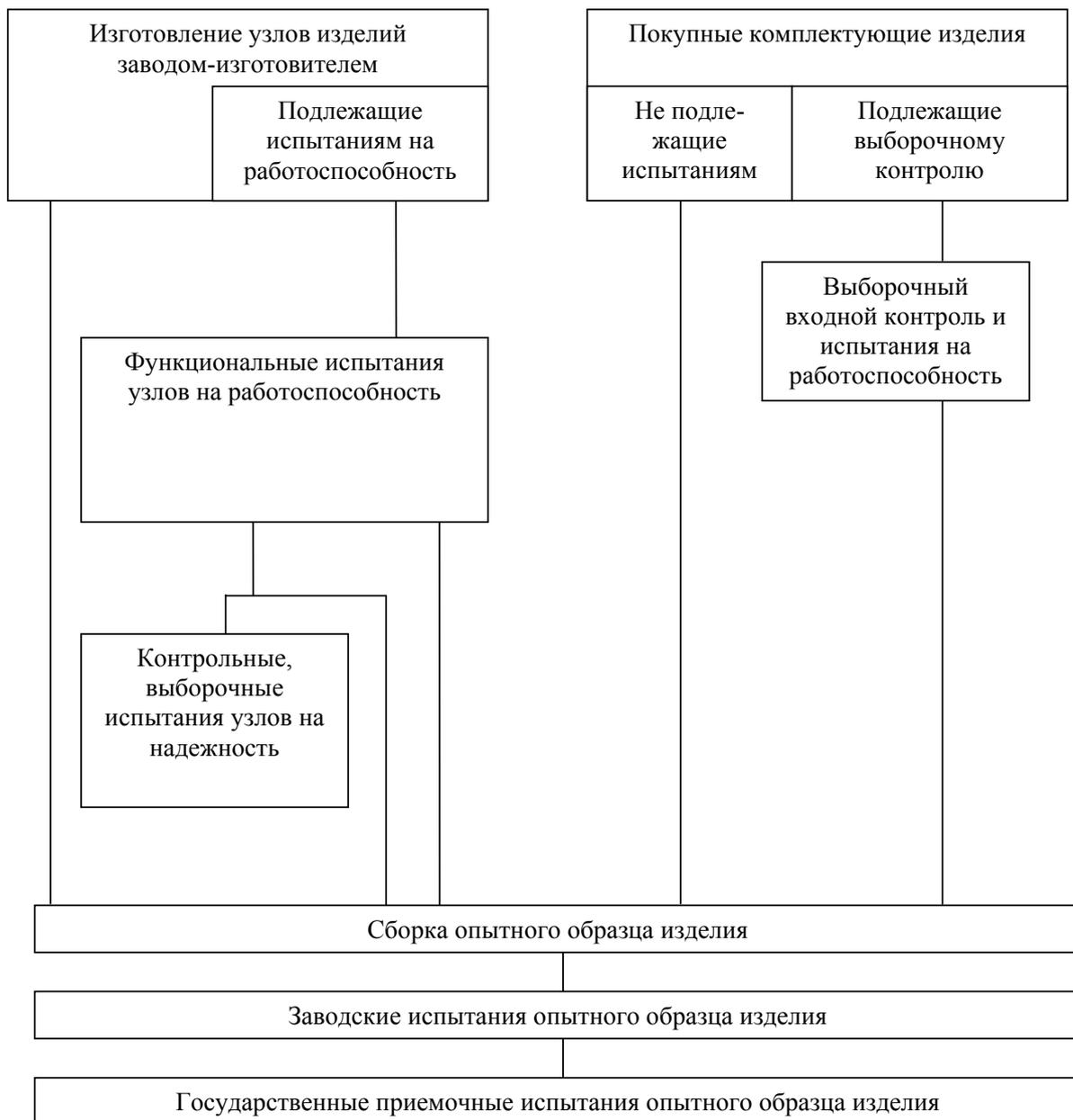


Рис. 5.3. Схема испытаний опытных промышленных образцов машин

Контрольные испытания проводят для контроля соответствия полученных показателей надежности требованиям стандарта и техническим условиям на изделие.

При заводских испытаниях опытного образца кроме показателей надежности определяется соответствие и других параметров технической характеристики параметрам и требованиям технического задания.

Заводские испытания проводятся преимущественно на полигоне завода-изготовителя комиссией под председательством технического директора завода-изготовителя.

В комиссию включаются также главный конструктор изделия, главный технолог завода-изготовителя, оператор машины и представители заинтересованных организаций: гостехнадзора, экологии, техники безопасности, профсоюза и т. д. Измерения проводят представители метрологии и Госстандарта.

При заводских испытаниях на надежность решаются две основные задачи:

- получение оценки надежности изделия и ее соответствие заданным требованиям;
- выявление «слабых мест» и разработка мероприятий по повышению надежности.

Основой теории надежности является статистический подход при рассмотрении событий отказов и их восстановлений. Но для этого необходимо множество этих случайных событий.

Если на каком-то этапе проектирования получена оценка вероятности отказа машины $q_{1(x)}$ наработку X и точность этой оценки характеризуется среднеквадратичным отклонением $\sigma_{1(q)}$, а затем проведено n испытаний наработку X , при которых зарегистрировано m отказов, то вероятность отказа машины после испытаний $q_{2(x)}$ с учетом предварительных данных и предположением, что вероятность отказов подчиняется гамма-распределению, будет равна:

$$q_{2(x)} = \frac{q_{2(x)} + \sigma_{2(q)} \cdot m}{q_{1(x)} + \sigma_{2(q)} \cdot n}; \quad (5.1)$$

$$\sigma_{2(q)} = \frac{q_{2(x)} + \sigma_{1(q)}}{q_{1(x)} + \sigma_{2(q)} \cdot m}. \quad (5.2)$$

Число испытаний n и число отказов m считают зачетными.

Эти формулы справедливы для изделий, которые не подвергались доработке.

Если установлена причина отказа, конструкторская или производственная, то проводится доработка машин, проводятся последующие испытания и определяется эффективность принятых мер доработки.

Оценка надежности с учетом доработок проводят в k этапов. Все отказы делятся на случайные и устраняемые конструктивно. Фиксируются три величины: a_i – число случайных отказов, b_i – число отказов после изменения конструкции для изменения случайных отказов;

c_i – число узлов, прошедших испытания без отказов. Предполагается, что вероятность появления случайного отказа $q_{0(x)}$ постоянна для всех этапов испытаний. Вероятность появления устраненного конструктивного отказа на i -м этапе испытаний $q_{i(x)}$.

Тогда вероятность безотказной работы машины после k -го этапа испытаний

$$P_{k(x)} = 1 - q_{k(x)} - q_{0(x)}; \quad (5.3)$$

$$q_{0(x)} = \frac{\sum_{i=1}^k a_i}{\sum_{i=1}^k (a_i + b_i + c_i)}; \quad (5.4)$$

$$q_{k(x)} = \frac{[1 - q_{0(x)}] \cdot b_k}{b_k + c_k}, \quad (5.5)$$

где $i = 1; 2; 3 \dots k$.

Положительным решением заводских испытаний является допуск к Государственным приемочным испытаниям опытного образца изделия.

Второй этап испытаний опытного образца – это *Государственные приемочные испытания*

Существующие методы заводских испытаний позволяют с высокой точностью определить уровень надежности изделий, так как испытательные лаборатории оснащены необходимым контрольно-измерительным оборудованием для диагностики и поиска неисправностей и отказов, а контроль работоспособности производится непрерывно.

Однако полученные значения показателей надежности могут не соответствовать эксплуатационным, так как воспроизвести весь комплекс внешних эксплуатационных факторов в условиях полигона завода невозможно.

Поэтому оценка реальной надежности машин может быть получена в реальных эксплуатационных условиях.

Государственные приемочные испытания проводятся в экстремальных условиях эксплуатации машин комиссией под председательством представителя организации генерального заказчика изделия. В состав комиссии входят главный конструктор, представители заво-

да-изготовителя и эксплуатирующей организации, а также представители заинтересованных организаций. Целью испытаний является определение показателей эксплуатационной надежности требованием технического задания на изделие.

Программа-методика испытаний согласовывается с генеральным заказчиком машины.

По каждому виду испытаний составляется протокол. По результатам всех испытаний составляется акт Государственных приемочных испытаний с приложением всех протоколов.

Оценка надежности машины зависит от ее структурно-логической схемы и определяется по ранее приведенной методике. При стационарном потоке отказов определяется наработка на отказ, параметр потока отказов, среднее время восстановления отказов и интенсивность восстановления.

По найденным характеристикам вычисляется коэффициент готовности:

$$K_r = \frac{T}{T(1 - \omega \cdot T)}, \quad (5.6)$$

где T – наработка на отказ; ω – параметр потока отказов.

6. ПОДДЕРЖАНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

6.1. Обеспечение запасными частями и их нормы расхода

Для поддержания надежности горных машин в процессе их эксплуатации необходимо обеспечить:

- правильный выбор горно-технических условий эксплуатации;
- повышение квалификации работников, обслуживающих машины и оборудование;
- своевременное снабжение запасными частями и расходными материалами машин;
- сбор данных об отказах и об опыте эксплуатации, техобслуживании и ремонте машин;
- связь с проектно-конструкторскими организациями и заводами-изготовителями машин;
- научная организация эксплуатации машин.

Правильный выбор горно-технических условий эксплуатации заложен в определении термина надежность «...способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации...». Он определяет использование каждой машины или оборудования по назначению, указанному в нормативно-технической эксплуатационной документации на изделие.

Повышение квалификации операторов машин, вспомогательного и ремонтного персонала обеспечит эксплуатацию изделий в строгом соответствии с их руководством по эксплуатации.

Связь с проектно-конструкторскими организациями и заводами-изготовителями изделий необходима для получения информации о модернизации изделия или их узлов и последующей покупке более надежных запасных частей.

В период гарантийного срока эксплуатации машин завод-изготовитель получает информацию о малонадежных и быстроизнашивающихся узлах и деталях изделия. Совместно с проектной орга-

низацией принимаются конструктивные и технологические меры по повышению их надежности.

С другой стороны, информацию о малонадежных узлах новых машин получают и дилеры, торговые организации по реализации запчастей данных заводов-изготовителей машин. Для обеспечения потребности эксплуатирующих организаций в малонадежных изделиях закупаются значительные их партии. После модернизации этих изделий на заводах-изготовителях малонадежные узлы оседают на складах торговых организаций. Они реализуются тем эксплуатирующим организациям, которые не имеют постоянной связи с проектными организациями и заводами-изготовителями машин.

Одной из составляющих общего времени восстановления отказов является время ожидания доставки отказавшей детали или узла. Если запасная часть имеется на складе предприятия, то доставка ее к месту эксплуатации отказавшей машины по времени незначительна.

Однако покупать и хранить на складе запчасти невыгодно, если потребность в них не обоснована.

Необходимо знать календарную периодичность замены быстроотказывающих деталей для сокращения срока восстановления аварийных или для их своевременной замены при плановых ремонтах, исключив при этом аварийные.

Обычно нормы расхода запасных частей определяют по статистическим данным об отказах машин в эксплуатации, требующих замены деталей. Но новые машины по конструкции отличаются от аналогов. Кроме того, новые машины изготавливаются из других материалов, по другой технологии и должны отвечать другим требованиям потребителя.

Изложенные методы расчета надежности машины на этапе проектирования позволяют вычислить прогнозные объемы производства и нормы расхода запасных частей для вновь создаваемых машин. Эти расчеты могут быть выполнены и механиками, эксплуатирующими машины. На основе этих расчетов можно с определенной достоверностью определить календарное время закупки запасных частей для замены отказывающих.

Основными исходными данными для этих расчетов являются расчетные значения средних ресурсов деталей, которые с помощью коэффициентов использования приводятся к единому для всех деталей календарному времени работы до их первой замены. Затем вычисляется число таких замен за межремонтный цикл и за каждый год эксплуатации машины, что дает возможность определить ожидаемую

потребность в запасных частях в зависимости от срока службы каждой машины, находящейся в смешанном по возрасту машинном парке эксплуатируемой техники. Учет изменения численности парка по возрастным группам дает возможность определить предполагаемые ежегодные объемы производства запасных частей по всей номенклатуре. Такова общая методология расчета объема производства и норм расхода запасных частей.

При этом следует иметь в виду, что потребность в замене деталей одного наименования из года в год возрастает по экспоненциальной зависимости. Поэтому желательно использовать в расчетах статистическую информацию о сроках службы конкретных машин до первой замены деталей данного типонаименования.

Определение потока замены деталей

Характеристики потоков замены деталей изменяются в каждом последующем ремонтном цикле. Поэтому определяется в первом приближении число ремонтных циклов за весь срок службы машины по методике [3].

Определяется число ремонтных циклов машин до ее списания:

$$Q' = \frac{8760 \cdot T_a \cdot K_u}{T_{\text{р.сплк}}} \leq Q, \quad (6.1)$$

где T_a – средний срок службы машины до ее списания, год; K_u – коэффициент использования машины в течение года; Q – округленное до ближайшего большего целого числа, число ремонтных циклов; $T_{\text{р.сплк}}$ – средний ресурс машины до первого капитального ремонта.

Число замен j -й детали рассчитывается по формуле, учитывающей весь срок службы машины:

$$F'_j = \frac{T_{\text{р.сплк}} \cdot K_j \cdot K_i \cdot Q'}{T_{\text{р.спл}j}} - 1 \leq F_j, \quad (6.2)$$

где K_j и K_i – коэффициенты использования j -й детали и i -го узла с j -й деталью; $T_{\text{р.спл}j}$ – средний ресурс j -й детали, ч; F_j – округленное до большего целого числа число замен j -й детали.

Среднее число замен j -й детали в каждом ремонтном цикле определяется по неокругленным данным:

$$Y_j = \frac{F_j + 1}{Q}. \quad (6.3)$$

Средние сроки службы машин до списания следует применять по периодически пересматриваемым нормам амортизационных отчислений.

Коэффициент использования машины в течение года K_u определяется в зависимости от режима работы предприятия отношением чистого времени работы машины к общему времени календарного года. При определении чистого времени работы учитывают: сменность работы, количество выходных и праздничных дней, плановые техобслуживания и ремонты, прогнозируемые простои по аварийным ремонтам и использование машины в течение смены.

Коэффициент использования i -го узла в машине K_i определяется отношением чистого времени работы узла к чистому времени работы машины в течение года.

Коэффициент использования j -й детали в i -м узле K_j определяется отношением чистого времени работы j -й детали к чистому времени работы узла в течение года.

Тогда номера замен f_j в каждом ремонтном цикле с номером $k=1; 2 \dots Q$ будут распределены:

$$\begin{aligned} \text{для } k=1 & \quad 0 < f_j \leq Y_j; \\ \text{для } k=2 & \quad Y_j < f_j \leq 2Y_j; \\ \text{для } k=Q & \quad (Q-1)Y_j < f_j \leq F_j. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Условный порядковый номер замены j -й детали в каждом ремонтном цикле (коэффициент периодичности замены) будет определен по выражению:

$$B_k = f_j = (k-1)Y_j; \quad (6.5)$$

здесь значения f_j принимают в интервале $(k-1)Y_j < f_j \leq kY_j$.

Коэффициент сокращения каждого последующего ремонтного цикла «с» принимают в интервале $0,8 \leq c \leq 0,95$.

Для вычисления периодов замены деталей необходимо определить срок службы каждой детали до ее первой замены:

$$f_j^{(1)} = \frac{T_{p.cpj}}{8760 \cdot K_u \cdot K_j \cdot K_i}. \quad (6.6)$$

Тогда срок замены j -й детали в каждом ремонтном цикле определяют с учетом условного порядкового номера замены B_k и сокращения продолжительности работы машины в каждом последующем ремонтном цикле «с»:

$$t_{\text{ц}j} = t_j^{(1)} \cdot B_k \cdot c^{k-1}. \quad (6.7)$$

Если вычислять периодичность замен с начала эксплуатации машины, нужно знать продолжительность работы машины к моменту возобновления ее работы после очередного капитального ремонта.

Для определения этой величины учитывают суммарное сокращение предыдущих ремонтных циклов через коэффициент:

$$S_k = \frac{1 - c^{k-1}}{1 - c}. \quad (6.8)$$

Если $Y_j \geq 1$, то суммарный срок службы машины с замененными деталями j -го наименования равен

$$t_{\sum j} = t_j^{(1)} \cdot Y_j \cdot S_k = t_j^{(1)} \cdot A_k, \quad (6.9)$$

где $A_k = Y_j \cdot S_k$.

Тогда поток замены деталей j -го наименования будет определен периодичностями:

$$t_j^{(f_i)} = t_{\sum j} + t_{\text{ц}j} = t_j^{(1)} (A_k + B_k \cdot C^{k-1}). \quad (6.10)$$

Если $Y_j < 1$, то срок службы j -й детали до ее первой замены будет превышать продолжительность первого ремонтного цикла машины и поток замен определится выражением, в котором учитывается сокращение сроков замены деталей j -го наименования, а не ремонтных циклов:

$$t_j^{(f_j)} = t_j^{(1)} \cdot f_j \cdot c^{f_j-1}. \quad (6.11)$$

Это первый этап определения потребностей в запасных частях машины.

Пример 1

Определить периодичность замены j -й детали по следующим исходным данным: $K_i = 0,3$; $K_i = 1$; $T_{\text{р.ср}j} = 300$ ч; $K_{\text{и}} = 0,15$; $T_a = 6$ лет; $T_{\text{р.ср}1к} = 4000$ ч; $c = 0,9$.

Решение

Вычисляют значение Q' :

$$Q' = \frac{8760 \cdot T_a \cdot K_{и}}{T_{p.cplk}} = \frac{8760 \cdot 6 \cdot 0,15}{4000} = 1,97.$$

Принимается $Q' = 2$.

Вычисляют число замен:

$$F_j^1 = \frac{T_{p.cplk} \cdot K_j \cdot K_i \cdot Q'}{T_{p.cpi}} = \frac{4000 \cdot 0,3 \cdot 1,0 \cdot 1,97}{300} = 6,86.$$

Принимается $F = 7$.

Находят значение $t_j^{(1)}$:

$$t_j^{(1)} = \frac{P_{p.cpi}}{8760 \cdot K_u \cdot K_j \cdot K_i} = \frac{300}{8760 \cdot 0,15 \cdot 0,3 \cdot 1,0} = 0,76 \text{ года.}$$

Определяют значение Y_j :

$$Y_j = \frac{F_j^1 + 1}{Q^1} = \frac{6,86 + 1}{1,97} = 4.$$

Таблица 1

K	f_j	B_k	S_k	A_k	$t_{\sum j}$	$t_{цj}$	$t_j^{(f_j)}$
1	1	1	0	0	0	0,76	0,76
	2	2	0	0	0	1,52	1,52
	3	3	0	0	0	2,28	2,28
	4	4	0	0	0	3,04	3,04
2	5	1	1	4	3,04	0,683	3,723
	6	2	1	4	3,04	1,366	4,406
	7	3	1	4	3,04	2,049	5,089

Так как $4 > 1$, то используют формулы определения $t_{цj}$; $t_{\sum j}$; $t_j^{(f_j)}$.

При $K=1$ $0 < 1_i \leq 4$; $f_j = 1, 2, 3, 4$.

При $K=2$ $4 < 1_i \leq 7$; $f_j = 5, 6, 7$.

Результаты расчета сводят в табл. 1.

Ежегодная потребность в запасных частях на одну машину

Для определения потребности в запасных частях j -й детали необходимо дополнительно учитывать степень разброса значений замен деталей. Величину $\sigma_j^{(f_j)}$ – среднеквадратичное отклонение продолжительности работы машины до каждой замены j -й детали определяют по формуле

$$\sigma_j^{(f_j)} = \sigma_j^{(1)} \cdot \sqrt{f_j}, \quad (6.12)$$

где значение $\sigma_j^{(1)}$ получают из статистической информации продолжительности работы детали до первой замены. При ее отсутствии для расчетов принимается $\sigma_j^{(1)} = 0,25$ года.

Для более точного определения потребности в запасных частях необходимо знать закон распределения замен. Наиболее распространен нормальный закон распределения замен, а следовательно, и поставки запасных частей. Для этого закона потребность рассчитывают путем интегрирования кривой распределения срока очередной замены j -й детали в пределах m года эксплуатации:

$$\Delta\Phi_{m,j}^{(f_j)} = \frac{1}{\sigma_j^{(f_j)} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{m-1}^m e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_j^{(f_j)}}{\sigma_j^{(f_j)}} \right)^2} dt, \quad (6.13)$$

величина $\frac{t-t_j^{(f_j)}}{\sigma_j^{(f_j)}} = Z$ представляет собой квантиль нормированной

случайной величины t (срока службы детали до очередной замены). Ее вычисляют по таблице интегралов вероятностей $\Phi(z)$ [3] для всех лет эксплуатации $m=1;2;\dots;a$:

$$\Delta\Phi_{m,j}^{(f_j)} = \Phi\left(\frac{m-t_i^{(f_j)}}{\sigma_j^{(f_j)}}\right) - \Phi\left(\frac{m-1-t_j^{(f_j)}}{\sigma_j^{(f_j)}}\right). \quad (6.14)$$

Ежегодная потребность для одной машины в долях единицы в j -й детали по всем номерам замен в пределах m года эксплуатации определяется суммой по всем заменам:

$$\Delta\Phi_{m,j} = \sum_{f_j=1}^{F_j} \Delta\Phi_{m,j}^{(f_j)}. \quad (6.15)$$

Потребность в заменяемых деталях j -го наименования на 1 машину в m году в долях массы машины или ее стоимости определяется:

$$q_{m,j} = \omega_j \cdot n_{3,j} \cdot \Delta\Phi_{m,j}^{(f_j)}, \quad (6.16)$$

где ω_j – масса (цена) детали, кг (руб); $n_{3,j}$ – число одновременно заменяемых деталей j -го наименования.

Общая потребность по массе (стоимости) в запасных частях в m год эксплуатации по всем наименованиям деталей:

$$q_m = \sum_{j=1}^f q_{m,j}. \quad (6.17)$$

Общая потребность в запасных частях расчет с каждым последующим годом эксплуатации машины до последнего года $m = a$. Этот рост подчиняется экспоненциальному закону распределения.

Ежегодные потребности производства запасных частей для парка эксплуатируемых машин

Объем производства запасных частей M_μ по сравнению с объемом основной выпускаемой продукции должны определяться соотношением

$$\alpha_\mu = \frac{M_\mu}{\omega \cdot N_\mu} < \alpha_{\text{пред}}, \quad (6.18)$$

где $\alpha_{\text{пред}}$ – предельное соотношение для всей номенклатуры запасных частей;

$$0,05 \leq \alpha_{\text{пред}} \leq 0,35; \quad (6.19)$$

ω – масса (цена) одной машины (без комплектующих узлов), тыс. руб.; N_μ – объем производства (выпуск) машин данной модели в μ году.

Объем производства запасных частей для каждого года выпуска вычисляют по выражению

$$M_{\mu} = \sum N_{\mu} \cdot q_m; \quad (6.20)$$

$$m = \alpha; \quad \mu = b;$$

$$m = 1; \quad \mu = 1,$$

где a – последний год эксплуатации машин; b – последний год выпуска машин данной модели.

Объем производства запасных частей в первый год выпуска ($\mu = 1$) для удовлетворения потребности в первом году эксплуатации ($m = 1$)

$$M_1 = N_1 \cdot q_1. \quad (8.21)$$

В последующем должны учитываться потребность в запасных частях машин предыдущих годов выпуска, смешанных по возрастам. При $\mu < a$:

$$\text{При } \mu = 2 \quad M_2 = N_2 q_1 + N_1 q_2;$$

$$\text{При } \mu = 3 \quad M_3 = N_3 q_1 + N_2 q_2 + N_1 q_3;$$

$$\text{При } \mu = 4 \quad M_4 = N_4 q_1 + N_3 q_2 + N_2 q_3 + N_1 q_4.$$

Объемы производства запасных частей при $\mu \geq a$, когда первый выпуск достиг предельного состояния и машина списывается из эксплуатации, должны обеспечивать в запасных частях оставшийся в эксплуатации парк машин более поздних видов:

$$\text{При } \mu = a \quad M_{\mu} = N_{\mu} q_1 + N_{\mu-1} q_2 + \dots + N_1 q_a;$$

$$\text{При } \mu = a+1 \quad M_{\mu} = N_{\mu} q_1 + N_{\mu-1} q_2 + \dots + N_2 q_a;$$

$$\text{При } \mu = a+2 \quad M_{\mu} = N_{\mu} q_1 + N_{\mu-1} q_2 + \dots + N_3 q_a.$$

В тех случаях, когда продолжительность производства машин превышает продолжительность их эксплуатации, т. е. имеет место условие: $b - a = \varepsilon$,

$$\text{При } \mu = b = a + \varepsilon \quad M_b = N_b q_1 + \dots + N_{\varepsilon+2} q_{a-1} + N_{\varepsilon+1} q_a.$$

После завершения производства машины запасные части должны выпускаться только для парка оставшихся в эксплуатации машин:

$$\text{При } \mu = b+1 \quad M_{b+1} = N_b q_2 + N_{b-1} q_3 + \dots + N_{\varepsilon+3} \cdot q_{a-1} + N_{\varepsilon+2} \cdot q_a;$$

$$\text{При } \mu = b+2 \quad M_{b+2} = N_b q_3 + N_{b-1} q_4 + \dots + N_{\varepsilon+3} q_a;$$

.....

$$\text{При } \mu = b+l \quad M_{b+l} = N_b q_{l+1} + N_{b-1} q_{l+2} + \dots + N_{\varepsilon+1+l} \cdot q_a.$$

Общее число лет производства запасных частей равно $(a+b-1)$.

Тогда в последнем году производство запасных частей при $\mu = a + \epsilon - 1$ $M_{\epsilon+a-1} = N_{\epsilon} \cdot q_a$.

Если продолжительность производства машин меньше их срока эксплуатации, $a - b = \epsilon$, то объемы производства запасных частей определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu = 1, & & M_1 &= N_1 q_1; \\ \mu = 2 & & M_2 &= N_2 \cdot q_1 + N_1 \cdot q_2; \\ & \dots & & \dots & & \dots \\ \mu = b, & & M_b &= N_b q_1 + N_{b-1} q_2 + \dots + N_1 q_{a-\epsilon}; \\ \mu = b + \epsilon = a; & & M_a &= N_b q_{\epsilon+1} + N_{b-1} q_{\epsilon+2} + \dots + N_2 q_{a-1} + N_1 q_a; \\ \mu = a + 1 & & M_{a+1} &= N_b \cdot q_{\epsilon+2} + \dots + N_2 \cdot q_a; \\ \mu = b + a - 1 & & M_{\epsilon+a-1} &= N_{\epsilon} \cdot q_a. \end{aligned}$$

Численность парка машин в каждом году эксплуатации определяется по планам производства новой техники с помощью матрицы вида

$$\| \Pi_m \| = \begin{vmatrix} N_1 & 0 & 0 & 0 \\ N_2 & N_1 & 0 & 0 \\ N_3 & N_2 & N_1 & 0 \\ \cdot & N_3 & N_2 & N_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ N_b & \cdot & N_3 & N_2 \\ 0 & N_b & \cdot & N_3 \\ 0 & 0 & N_b & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & N_b \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \\ \Pi_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Pi_{b+a-1} \end{vmatrix}. \quad (6.22)$$

После определения предполагаемых объемов выпуска запчастей проверяется выполнение условия: $\alpha_{\mu} = \frac{M_{\mu}}{\omega \cdot N_{\mu}} < \alpha_{\text{пред.}}$

Если данное условие не подтверждается, то может возникнуть дефицит запасных частей:

$$\Delta M_{\mu} = (\alpha_{\mu} - \alpha_{\text{пред.}}) \cdot \omega \cdot N_{\mu}, \quad (6.23)$$

который следует ликвидировать за счет совершенствования конструкции машины или технологии её производства.

Расчет показателей надежности машин на основе ожидаемых норм расхода запчастей

Предложенная методика расчета запасных частей может использоваться для предварительной оценки надежности новой техники по частоте отказов и объемам потребления запчастей в период эксплуатации техники.

Средняя годовая норма расхода j -й запасной части в стоимостном или физическом выражении на одну машину в m году эксплуатации парка, тыс.руб. (т) /год

$$h_{m,g}^{(j)} = \frac{M_{\mu,j}}{\Pi_m}, \quad (6.24)$$

где Π_m – парк машин, определяемый матрицей (6.22)

Средняя годовая норма расхода j -й запасной части в натуральном выражении на 1 машину в m году эксплуатации парка машин, шт/год,

$$h_{m,h}^{(j)} = \frac{M_{\mu,j}}{\omega_j \Pi_m} = \frac{h_{m,g}^{(j)}}{\omega_j}. \quad (6.25)$$

Средняя норма расхода j -й запасной части в натуральном выражении на 1000 часов наработки машины определяется формулой

$$h_{1000}^{(j)} = \frac{h_{m,n(g)}^{(j)}}{8,76 \cdot K_u}. \quad (6.26)$$

Средняя норма расхода по всей номенклатуре запасных частей на один год эксплуатации или на 1000 часов наработки определится по выражению

$$H_m = \frac{M_{\mu}}{\Pi_m};$$

$$\text{на 1000 ч} \quad H_{1000} = \frac{H_m}{8,76 \cdot K_u}. \quad (6.27)$$

Средний расход запасных частей в относительных единицах на 1 машину за весь период эксплуатации (показатель потребления) находят по формуле

$$\lambda = \frac{\sum_{\mu=1}^{e+a-1} M_{\mu}}{\omega \sum_{\mu=1}^e N_{\mu}}. \quad (6.28)$$

Полученные значения используются для определения показателей надежности. Значение наработки на отказ машины по замене j -й детали в m - году эксплуатации будет равно:

$$T_{o,j} = \frac{8760 \cdot K_n \cdot n_3 \cdot j}{h_{m,n}^{(j)}}. \quad (6.29)$$

Наработка на отказ i -го узла

$$T_{oi} = 8760 \cdot K_n \left(\sum_{i=1}^l \frac{n_i}{T_{oi}} \right)^{-1}. \quad (6.30)$$

Наработка на отказ машины

$$T_o = 8760 K_n \left(\sum_{i=1}^s \frac{n_i}{T_{oj}} \right)^{-1}. \quad (6.31)$$

В формулах l – число различных заменяемых деталей в узле; S – число заменяемых деталей в машине; n_3 – число одновременно заменяемых деталей одного типонаминала; n_j – число однотипных деталей.

Если в формулах вместо стоимости деталей подставить значения оперативных ремонтных затрат, то получим средние затраты на замену j -й детали в m году эксплуатации.

Суммируя эти затраты по всем заменяемым деталям и всем годам службы машины получим среднее значение суммарной трудоемкости ремонтов

$$S_p^{\Sigma} = \sum_{m=0}^{m=T_{\text{сл.ср}}} \cdot \sum_{i=1}^S S_{mj}. \quad (6.32)$$

Зная значение среднего ресурса машины можно получить другой показатель ремонтпригодности – удельную суммарную оперативную трудоемкость ремонтов:

$$S_p = \frac{S_p^{\Sigma}}{T_{\text{п.ср}}}. \quad (6.33)$$

6.2. Научная организация эксплуатации машин

Представленный расчет норм расхода запасных частей для новых машин является предварительным ориентировочным, но его результаты заносятся в эксплуатационную документацию машины. Они являются усредненными и не учитывают конкретных условий эксплуатации машин.

В действительности условия эксплуатации могут быть более легкими или более тяжелыми и отличаются от усредненных. Поэтому механику эксплуатирующей организации необходимо иметь фактические сведения об отказах машин, эксплуатирующихся в идентичных или хотя бы аналогичных условиях эксплуатации, обобщать опыт эксплуатации однотипных машин.

Многие узлы и детали горных машин и оборудования имеют большой разброс наработок до отказа. Не имея информации о фактических показателях надежности этих деталей, профилактические замены выполняют в периоды плановых технических обслуживаний и ремонтов. Периодичность, состав и трудоемкость планово-предупредительных ремонтов будут определяться с учетом нормативно-технической документации на изделие. Однако ряд деталей и узлов отказывает между плановыми ремонтами, создавая аварийные отказы. При восстановлении аварийных отказов выполняются те же работы, что и при профилактических заменах деталей в плановые ремонты. При этом возрастают затраты от простоев машин, работающих в комплексе с отказавшей. Профилактическая замена деталей через период, равный минимальной наработке до отказа, является экономически не оправданной. В работе [9] для установления условия целесообразности и величины оптимального интервала профилактических замен деталей предложена формула

$$K_{сз} = \frac{m_{ср}(\tau_3)}{\tau_3 \cdot \lambda_0} + \frac{N_0}{\tau_3 \cdot \lambda_0} \cdot \frac{\sum C_{пр}}{\sum C_0}, \quad (6.34)$$

где $K_{сз}$ – показатель целесообразности профилактик (отношение стоимости эксплуатации при проведении профилактических замен к стоимости эксплуатации без них); λ_0 – количество отказов в единицу времени при эксплуатации без профилактических замен; $m_{ср}(\tau_3)$ – количество отказов за период τ_3 при проведении профилактических за-

мен; N_0 – количество профилактически замененных деталей; $\sum C_{пр}$ – средняя стоимость одной профилактической замены детали; $\sum C_0$ – средняя стоимость «отказа», равная сумме стоимости профилактической замены и дополнительных убытков из-за простоев оборудования и других последствий отказа.

Интервал профилактических замен должен выбираться таким, чтобы величина коэффициента $K_{сз}$ была минимальной и должна быть меньше единицы.

Рациональный интервал профилактических замен определяется с учетом показателей безотказности, полученных по данным эксплуатации машины:

$$K_{сз} = \frac{T_0}{\tau_3} \left[1 - P_{(\tau_3)} + \frac{\sum C_{пр}}{\sum C_0} \right], \quad (6.35)$$

где T_0 – средняя наработка детали до отказа; $P_{(\tau_3)}$ – вероятность безотказной работы детали за период τ_3 .

Следовательно, чтобы определить рациональную периодичность планово-предупредительных ремонтов с учетом конкретных условий эксплуатации машин, необходима информация о количестве отказов, средней наработке до отказа, затратах на проведение плановых и неплановых (аварийных) работ за заданный период эксплуатации машины. Полученные периодичности, а возможно, и трудоемкости плановых ремонтов будут отличаться от рекомендаций нормативно-технической документации, но технически и экономически будут оправданы.

6.3. Связь с проектными организациями и заводами-изготовителями машин

Каждый завод-изготовитель машин и оборудования старается выпускать конкурентоспособную продукцию. Надежность изделий является одним из основных свойств качества продукции. Имея информацию о надежности узлов и деталей своих машин за гарантийный период (наличие или отсутствие рекламаций) и в послегарантийный (периодическое наблюдение) завод совместно с проектной орга-

низацией без общей модернизации машины совершенствует и повышает надежность быстроотказывающих деталей и узлов, внося в них конструктивные изменения.

Эксплуатирующие организации, не имеющие связи с проектными организациями и заводами-изготовителями, покупают эти детали по старой номенклатуре малонадежными, несут постоянные убытки от их отказов и замен.

Связь с заводами и проектными организациями позволяет иметь информацию не только о новых или планируемых к выпуску новых машинах, но и информацию о изменениях в серийно выпускаемых машинах и их показателях надежности.

6.4. Диагностика технического состояния машин

Процесс определения технического состояния изделий с определенной точностью называется техническим диагностированием. Результатом диагностирования является заключение о техническом состоянии изделия с указанием мест, видов и причин дефектов. Своевременное обнаружение дефектов позволяет их устранять в плановом порядке, что повышает показатели надежности и технико-экономические показатели эксплуатации машин. Это достигается решением следующих задач: предотвращением аварийных отказов; корректировкой сроков и объемов технического обслуживания и ремонтов; увеличением фактического времени работы машины, сокращением потребности в новых деталях в результате своевременного их ремонта. Необходимый эффект достигается при организации плановых ремонтов машин «по потребности».

Диагностика базируется на экономических основах. Она эффективна тогда, когда затраты на нее меньше, чем экономия затрат от расходуемых запчастей, повышения производительности машин, сокращения трудовых затрат на ремонт и др.

Номинальные и предельные величины параметров диагностирования должны приводиться в контрольно-диагностических картах нормативной конструкторской документации на изделие.

По точности оценки технического состояния изделия можно разделить диагностирование на приближенное и точное. Приближен-

ное производится при помощи органов чувств исполнителя или простейших приборов, точное требует специальных контрольно-измерительных приборов и значительных ресурсов на его проведение.

Диагностические средства делятся на встроенные в машину и внешние. Встроенные датчики, индикаторы входят в конструкцию машины и являются средствами непрерывного наблюдения. Примером могут служить приборы засоренности фильтров, гидрожидкостей и масел, объема (уровня) топлива и масел, температуры жидкостей, давления, напряжения и силы тока и др.

Внешние средства диагностирования бывают переносными, передвижными и стационарными.

Переносные определяют, например, концентрации сажи и СО в газах, углы опережения зажигания и своевременность подачи топлива в двигатели внутреннего сгорания, давления в картере, в топливной системе, напряжение в зарядной цепи, плотность электролита и др.

Передвижные оснащаются тормозными устройствами, подключаемые к основной трансмиссии и измеряют несколько параметров характеристики изделия.

Стационарные средства диагностирования используются в мастерских. Они оценивают изделие в целом, используя механические, температурные, акустические, электрические, тензометрические и оптические методы.

6.5. Мероприятия по обеспечению надежности машин в условиях холодного климата

Условия эксплуатации горнодобывающих машин в районах Сибири и Севера

Развитие горнодобывающей промышленности в районах Сибири и Севера выявили проблему повышения надежности эксплуатируемых там машин и механизмов, подвергающихся постоянному воздействию низких температур и других факторов холодного климата. Влияние этих факторов обуславливает снижение надежности машин в зимнее время на 15–20 %, увеличение трудозатрат на техобслуживание и ремонты, сокращение срока службы техники и оборудования.

Низкий уровень технической готовности машин ($K_T=0,8\div 0,9$) в большинстве случаев компенсировался увеличением парка дейст-

вующих машин, что приводило к росту основных фондов, снижению экономической эффективности работы машин и оборудования.

Кроме непосредственного влияния низких температур на работу машин (до минус 60°C), необходимо учитывать наличие вечной мерзлоты, полярной ночи, снежную целину, сложный рельеф с вмерзшими валунами и обломками скальных пород, необходимость хранения машин в полярную пургу. Для периода переменных температур – оттаявший слой грунта на мерзлом основании, заболоченную поверхность тундры.

Были разработаны система стандартов по климатическому районированию страны, технические требования к изделиям в исполнении для холодного климата («ХЛ»), указаны способы обеспечения надежности машин в экстремальных условиях.

Требования по обеспечению надежности и работоспособности изделий

Для обеспечения надежности и работоспособности изделий в исполнении для холодного климата должен быть осуществлен комплекс мероприятий при их проектировании. Это специальные, конструктивные решения, повышение прочности и износостойкости, поправки к системе допусков и посадок, применения морозостойки материалов, специальные технологии сварки, термообработки, защитных покрытий и т. д. Например, основные узлы машин должны проектироваться с учетом всех факторов и условий эксплуатации, отмеченных выше. При этом двигатели внутреннего сгорания должны быть готовы для работы под нагрузкой при температуре минус 40°C за 30 мин, при минус 60°C – за 45 мин. Кожухи и капоты должны оснащаться теплоизолирующими и теплорегулирующими устройствами, защищать от проникновения снежной пыли. Кабины машин должны быть теплоизолированы, обеспечивать необходимый воздухообмен, нагревательные устройства создавать температуру не ниже 10°C .

Пневматические системы должны снабжаться устройствами, предотвращающими замерзание в них влаги и конденсата. Системы смазки должны быть централизованными. В гидравлических системах должна применяться низкотемпературная рабочая жидкость. В системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания – специальные низкотемпературные жидкости.

Электрическая проводка и кабели должны иметь морозостойкое и влагостойкое изоляционное и защитное покрытие, выполняться только медными проводами.

При компоновке изделий следует стремиться к максимальной взаимозаменяемости сборочных единиц и агрегатов.

При расчете допусков и посадок учитывается температурное изменение посадок, разность коэффициентов линейного расширения материалов и увеличенный перепад рабочих температур соединений. Ввиду того, что линейные размеры и технические характеристики машин в исполнении для холодного климата остаются идентичными с машинами для умеренного климата по технологическим соображениям компенсацию допусков и посадок производят за счет сокращения допуска вала, сохраняя допуск отверстия.

Требования к материалам изделий

В качестве материалов для изготовления *стальных конструкций* применяют стальной прокат без дополнительной термообработки, но только из спокойной стали, или из стали, стабилизированной алюминием марки 0,8Ю. Стальной прокат после термической обработки, проводимой потребителем, рекомендуется различных марок, в зависимости от толщины сквозной прокаливаемости и требуемого предела прочности. Термообработка заключается в закалке и отпуске при температуре 200°С для сталей из содержания хрома и 500 – 600°С для сталей без него.

Для конструкций из труб и сварных металлоконструкций рекомендуются низколегированные стали типа 0,9Г2С и 10ХСНД. Стальные отливки следует применять только после термообработки: нормализация, закалка – отпуск.

Для сварных соединений следует применять автоматическую и полуавтоматическую сварку, в том числе в среде углекислого газа под флюсом. Для снижения влияния концентраторов напряжения обработку деталей давлением следует проводить в горячем состоянии 900 – 1100°С. Охлаждение деталей до 300°С следует проводить в печи, интенсивное охлаждение не допускается.

Для резинотехнических изделий, работающих в воздушной среде, коэффициент морозостойкости по эластичному восстановлению после 30 % сжатия при минус 60°С должен быть не менее 0,2. Степень сжатия герметизирующих прокладок должна быть 15–35 %. Температура хрупкости резинотехнических изделий должна быть не выше минус 60°С.

Изделия из пластмасс должны выполняться из специальных фторопластов, полиолефинолов, полистерольных пластиков, поливинилоцетатных и пенопластов, пластиков на основе эфиров целлюлозы, полиамидов, слоистых материалов.

Нефтепродукты для изделий, предназначенных для эксплуатации в холодном климате, должны быть с улучшенными низкотемпературными свойствами.

Бензины применять с повышенным октановым числом, с температурой помутнения не выше минус 60°C.

Дизельное топливо с цетановым числом не менее 50 и температурой застывания не выше минус 60°C.

Трансмиссионные масла не должны застывать при температурах минус 40 – 50°C и содержать противоизносные присадки.

Гидравлические и тормозные амортизаторные жидкости не должны замерзать при температуре минус 60°C. Значения вязкости рабочей жидкости, определяющие нижний предел ее применения и обеспечивающие минимально необходимую прокачиваемость не должны превышать:

4500 – 5000 сСТ – для шестеренных насосов при 600 об/мин;

3500 – 4500 сСТ – для пластинчатых насосов при 1250 об/мин;

1800 – 2000 сСТ – для аксиально-поршневых насосов.

Пневмоколесные шины должны иметь повышенную прочность на разрыв, повышенную стойкость к истиранию, температуру хрупкости не менее минус 60°C.

Требования к испытаниям и документации

Головные и опытные образцы изделий в исполнении для холодного климата должны пройти испытания в экстремальных условиях их последующей эксплуатации.

Гарантийный срок службы изделий должен быть не меньше чем у изделий для умеренного климата.

Руководство по эксплуатации изделий должно быть дополнено разделами, содержащими особенности ухода и эксплуатации за системами отопления, охлаждения, технического обслуживания, хранения и консервирования машин, монтажа и демонтажа в условиях холодного климата, а также дополнительными требованиями по технике безопасности и перечнем возможных повреждений и отказов в работе специальных систем и узлов, способами их устранения.

Для машин, оборудованных двигателями внутреннего сгорания должны быть дополнительные разделы по подготовке всех систем двигателя к пуску и пуск при низких температурах, уходу за аккумуляторными и тормозной системой, а также перечнем допускаемых к применению горюче-смазочных материалов и присадок к ним, охлаждающих рабочих жидкостей.

Анализ хрупких разрушений металлоконструкций при низких температурах на примере карьерных экскаваторов типа ЭКГ

Хрупкое разрушение является разновидностью обычного разрушения от воздействия внешних нагрузок. Оно, как правило, возникает внезапно и зависит от структуры материала, наличия концентраторов напряжений, скорости приложения нагрузок, и понижения температуры окружающей среды.

Хрупкие разрушения, возникающие при ударных нагрузках и низких температурах воздуха, называют *хладоломкостью* конструкций. При этом напряжения в материале небольшие, а разрушение происходит из-за наличия концентраторов напряжений. Хрупкому разрушению также предшествуют пластические деформации, искажающие кристаллическую решетку металла под нагрузкой из-за точечных дефектов материала. Хрупкому разрушению свойственен также накопительный характер напряжений, называемый *усталостью металла*. Скрытый период накопления трещин занимает до 90 % общего времени работы конструкций под нагрузкой. После чего происходит мгновенное разрушение конструкций.

Важным мероприятием по повышению надежности металлоконструкций является выбор технологий термической обработки конструкции в период ее изготовления и ремонта.

Одним из основных факторов, влияющим на разрушение, является характер приложения нагрузок. Наиболее опасны динамические нагрузки при отрицательных температурах. В момент их проявления прочность материала уменьшается примерно в 2 раза. Чем масштабнее металлоконструкции, тем больше в ней вероятность дефектов. Поэтому у экскаваторов ЭКГ–20 наблюдалось большее число отказов металлоконструкций, чем у других карьерных экскаваторов.

Нагрузки зависят от состояния подготовки забоя экскаватора. С повышением прочности породы опасность динамических нагрузок возрастает. На мерзлых грунтах нагрузки возрастают на 25–30 %.

Хладоломкость металлоконструкций экскаватора зависит от качества и хладоломкости металла, совершенства конструкций, уровня действующих нагрузок и напряжений и климатических факторов внешней среды. Металл и конструкцию определяют при проектировании. Нагрузки с понижением температуры воздуха можно дифференцировать, и таким образом уменьшить вероятность хрупких разрушений металлоконструкций.

Результаты исследований подтверждают необходимость дифференцированного подхода к регулированию нагрузок по интервалам низких температур, типов конструкций экскаваторов, категории разрабатываемых грунтов.

Техническая реализация регулирования возможна с применением автоматизированных систем. Однако при регулировании нагрузок происходит изменение цикла работы экскаватора, снижается производительность. Но углубленный анализ показал, что растяжка цикла экскаватора в результате регулирования загрузки его приводов приводит к незначительному снижению его производительности (0,4–0,5 %) от номинальных значений. А рост общего баланса машинного времени работы экскаваторов существенно возрастает из-за снижения простоев из-за аварийных ремонтов.

Наибольшая эффективность регулирования имеет место в зоне холодного климата работы экскаваторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория надежности – это научная дисциплина, применительная для любых технических изделий. Однако для каждого направления изделий определяющими являются свои конкретные показатели, обеспечивающие заданную надежность.

Конструкции многих современных машин довольно быстро устаревают, что затрудняет накопление опыта их проектирования, производства и эксплуатации. В настоящее время ведутся закупки и внедрение в горное производство наиболее прогрессивных зарубежных машин. Выявляются их надежные, высокотехнологичные и производительные узлы и системы, которые, как правило, выпускаются специализированными фирмами. Эти узлы закупаются и внедряются в отечественные машины. Ведется выборочная интеграция однотипных элементов технологических машин в изделия аналогичного назначения в мировом масштабе.

Основными тенденциями современного машиностроения являются конструктивное усложнение и повышение научно-технического уровня изделий; рост интереса к вопросам надежности и безопасности машин и конструкций на всех стадиях их жизненного цикла; увеличение роли моделирования и вычислительного эксперимента, сравнения различных вариантов, полное использование автоматизированного и компьютерного проектирования машин.

Ввиду невозможности проведения ускоренных ресурсных испытаний большинства узлов и горных машин в целом большое значение имеют расчеты надежности машин на стадии их проектирования.

При достигнутых успехах в разработке программ расчетов на прочность, долговечность, износ, вычислительного моделирования, как составных частей автоматизированного компьютерного проектирования необходимы только знание исходных данных для конкретных разработок. Компьютерное проектирование вытеснило ручной способ черчения, ЭВМ-ные расчеты. За конструктором остались общие творческие вопросы, решение которых и определяет характеристики машин и их надежность.

В этих условиях наиболее важное значение приобретают знания эксплуатационного персонала машин об основных понятиях надежности, возможных отказах, причинах их возникновения, способах устранения, методах обеспечения и поддержания надежности на всех стадиях жизнедеятельности машин, изложенных в настоящем пособии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хазов, Б.Ф. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

2. Солод, В.И. Надежность горных машин и комплексов : учеб. пособие / В.И. Солод, В.Н. Гетопанов, И.Л. Шильберг; МГИ. – М., 1972. – 198 с.

3. Гетопанов, В.Н. Проектирование и надежность средств комплексной механизации / В.Н. Гетопанов, В.М. Рачек. – М.: Недра, 1986. – 208 с.

4. Кох, П.И. Надежность механического оборудования карьеров / П.И. Кох. – М.: Недра, 1978. – 189 с.

5. Махно, Д.Е. Эксплуатация и ремонт карьерных экскаваторов в условиях севера / Д.Е. Махно. – М.: Недра, 1984. – 133 с.

6. ГОСТ 14892–89. Машины, приборы и другие технические изделия предназначенные для эксплуатации в районах с холодным климатом. Общие технические требования / Госкомстандарт. – М., 1989. – 63 с.

7. Краев, М.В. надежность автономных энергических установок, учебное пособие / М.В. Краев, В.П. Назаров, В.М. Краев, В.Г. Ячубенко: под общ. ред. проф. М.В. Краева; САА 2-е изд. перераб. и доп. – Красноярск, 2001. – 286 с.

8. Вентгцель, Е.С. Теория вероятностей: учебник вузов / Е.С. Вентгцель; 5-е изд. стереотип. – М: Высш. шк., 1998. – 576 с.

9. Кубарев, А.И. Надежность в машиностроении / А.И. Кубарев; 2-е изд. доп. – М: Изд-во стандартов, 1989. – 224 с.

10. Труханов, В.М. Надежность изделий машиностроения. Теория и практика: учебник / В.М. Труханов. – М: Машиностроение, 1996. – 336 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ.....	5
1.1. Основные положения.....	5
1.2. Система стандартов «надежность в технике».....	6
1.3. Термины и определения.....	7
1.4. Актуальность повышения надежности технологических машин и комплексов.....	11
1.5. Единичные показатели надежности.....	13
1.6. Комплексные показатели надежности.....	23
1.7. Определение показателей надежности. Примеры решения задач.....	26
2. ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ.....	31
2.1. Основные понятия теории вероятности.....	31
2.2. Теоремы, применяемые в теории надежности.....	32
2.3. Понятия законов распределения и числовых характеристик случайных величин.....	34
2.4. Законы распределения случайных величин.....	40
3. ОТКАЗЫ ГОРНЫХ МАШИН, ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ.....	45
3.1. Оснащенность горнодобывающей отрасли горно- транспортным оборудованием на примере предприятий открытой угледобычи Кузбасса.....	45
3.2. Техническое состояние горно-транспортного оборудования на примере Кузбасса.....	48
3.3. Физическая природа и причины отказов.....	50
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПО СТАТИС- ТИЧЕСКИМ ДАННЫМ.....	66
4.1. Организация работ по обеспечению надежности изделий на стадии проектирования.....	66
4.2. Методика сбора информации о надежности машин.....	68
4.3. Обработка статических данных о надежности.....	70
4.4. Определение доверительных интервалов для показателей надежности.....	76
4.5. Определение требуемого уровня надежности проектиру- емого изделия.....	77

4.6. Структурный анализ надежности.....	81
4.7. Резервирование.....	83
4.8. Основные способы повышения надежности машин при проектировании.....	90
4.9. Основные требования и методология расчета показателей надежности узлов машин	91
5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ	98
5.1. Технологические мероприятия и автоматизация производства.....	98
5.2. Контроль качества выпускаемой продукции	100
5.3. Испытания узлов и машин при их изготовлении	102
6. ПОДДЕРЖАНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ	108
6.1. Обеспечение запасными частями и их нормы расхода.....	108
6.2. Научная организация эксплуатации машин.....	120
6.3. Связь с проектными организациями и заводами-изготовителями машин	121
6.4. Диагностика технического состояния машин.....	122
6.5. Мероприятия по обеспечению надежности машин в условиях холодного климата	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	130

Учебное издание

Карепов Владимир Андреевич
Безверхая Елена Владимировна
Чесноков Валерий Тимофеевич

НАДЕЖНОСТЬ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие

Редактор И.Н. Байкина
Корректор Т.А. Загидулина

Компьютерная верстка И.В. Гревцовой

Подписано в печать 23.01.2013. Печать плоская. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,38. Тираж 100 экз. Заказ № 9129

Издательский центр
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
Тел./факс (391) 206-21-49. E-mail: rio@sfu-kras.ru
<http://rio.sfu-kras.ru>

Отпечатано Полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. 206-26-67, 206-26-49