

+ 630<sup>x</sup>  
ЖС 86

МИНИСТЕРСТВО НАРОДНОГО ОБРАЗОВАНИЯ БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА

А.В.ЖУКОВ

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Тексты лекций для студентов спец. 17.04 МОЛК

Утверждено ученым советом института  
в качестве учебного пособия

Минск 1989

УДК 629.114.2: 624.04

Рассмотрено и рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом института

Духов А.В. Надвижность машин и оборудования. Учебное пособие. - Мн.: БТИ им. С.М.Кирова, 1989. - 61 с.

Изложены основные понятия, положения и определения надежности. Дана статистическая оценка основных показателей надежности. Характеризуются причины потери работоспособности и физическая сущность отказов лесотранспортных машин и оборудования.

Основное внимание уделено методам расчета и испытаний машин и оборудования на надежность. Дается оценка основных направлений повышения надежности, а также ее экономической эффективности.

Для студентов спец. 17.04 "Машины и оборудование лесного комплекса".

Научный редактор доцент И.В.Турлай.

Рецензенты: профессор В.В.Гуськов,  
доцент Л.И.Кадолко.

© Белорус. ордена Трудового  
Красного Знамени технол.  
ин-т им. С.М.Кирова, 1989



## ВВЕДЕНИЕ



Основным направлением технического прогресса лесозаготовительного производства является его механизация. Лесная промышленность в настоящее время оснащена и продолжает оснащаться большим количеством многооперационных гидрофицированных машин, что предъявляет повышенные требования к их техническому уровню, который в значительной степени определяется надежностью.

Оценка надежности изделия - вопрос, которому должно уделяться первоочередное внимание с момента производства и использования любого технического устройства, в том числе и лесозаготовительного оборудования. Опыт эксплуатации таких машин, как ЛП-30, ЛП-19, ЛП-17, ЛТ-171 и других, показывает, что эффективность их использования, зависит в значительной степени от надежности.

Надежность машин связана с повышением уровня автоматизации, уменьшением затрат на ремонт, снижением убытков от простоев, обеспечением безопасности человека. Эти вопросы можно решить только с помощью инженерно-технических работников, которые знают теорию и практику надежности машин. Поэтому изучение научных основ надежности стало неотъемлемой частью учебного процесса в технических вузах.

Ряд основных положений науки о надежности базируется на теории прочности и износостойкости деталей и материалов. Однако необходимо отметить, что если инженерные расчеты на прочность в настоящее время практически не проблематичны, то расчет долговечности в теории надежности машин представляет значительные трудности. Особенно с учетом главного критерия - износостойкости. Из-за износа деталей и сопряжений в 80 случаях из 100 оборудование теряет свою работоспособность.

Наука о надежности в настоящее время выделялась в самостоятельную дисциплину, которая изучает закономерности изменения показателей работоспособности изделий с течением времени, а также физическую природу отказов и разрабатывает методы, обеспечивающие необходимую долговечность и безотказность машин. Т.е. обеспечивается научный прогноз пове-



дения машин и разрабатывается теория принятия оптимальных решений для получения требуемого уровня надежности.

Надежность (общая) - это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие требуемые функции в заданных условиях эксплуатации.

Надежность как свойство изделия сохранять работоспособность в течение заданного промежутка времени может рассматриваться при непрерывной работе изделия (безотказность) и с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта (долговечность).

Наука о долговечности анализирует процесс изменения показателей надежности с течением времени, причины возникновения отказов и разрабатывает рекомендации по восстановлению начальных параметров машин.

В процессе эксплуатации машина подвергается воздействию внешней среды, влиянию процессов в ней самой, что снижает ее начальные характеристики. Эти процессы носят случайный характер и поэтому для оценки надежности машин применяются теория вероятностей и методы математической статистики. Недостаточная надежность машин приводит к большим затратам на ремонт, простоям.

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ПОЛОЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Теория надежности является комплексной дисциплиной и состоит из таких разделов, как математическая теория надежности, надежность по отдельным физическим критериям отказов, расчет и прогнозирование надежности, мероприятия по повышению надежности, контроль надежности (испытания, статистический контроль, организация наблюдений) и техническая диагностика, теория восстановления, экономика надежности.

### 1.1. Объекты

Надежность рассматривается применительно к техническим системам и их элементам.

Техническая система - совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Система состоит из элементов - простейших составных частей изделия (деталь, узел, агрегат).

Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи. В этом смысле лесотехнологическое оборудование, автомобиль или трактор можно рассматривать как системы, состоящие из отдельных элементов (сборочных единиц). Сборочная единица также может рассматриваться как система, состоящая из деталей. При изучении надежности комплекса, например, лесосечных машин, отдельная машина (трелевочный трактор, челночной погрузчик) является элементом системы. Изделия, т.е. системы и их элементы, бывают ремонтируемыми (восстанавливаемыми) и неремонтируемыми (невосстанавливаемыми).

Ремонтируемые изделия: тракторы, автомобили, технологическое оборудование, а также их детали (рамы, редукторы, отдельные детали и т.д.).

Неремонтируемые изделия: системы и их элементы, не подлежащие ремонту и восстановлению (поршневые кольца, тормозные накладки, фрикционные накладки сцепления, сальники и т.д.). Простые элементы, изготавливаемые массово, часто не восстанавливаются.

В зависимости от технического состояния одни и те же изношенные изделия могут быть восстанавливаемыми или невосстанавливаемыми. Например, коленчатый вал с трещинами и без трещин.

## 1.2. Свойства продукции

Обобщенное понятие продукция подразделяется на виды: изделия и продукты.

Изделие - продукция промышленного производства (штуки, экземпляры). Это могут быть системы и их элементы (трактор, сборочные единицы и детали, технологическое оборудование - гидроманипулятор, коник и т.д.).

Продукт - результат производственного процесса (древесина), измеряемый в кг, м<sup>3</sup>.

При эксплуатации у изделий расходуется ресурс. Если в процессе использования изделий они подвергаются расходу (нефтепродукты), то используют термин потребление.

Качество продукции - совокупность свойств, т.е. объем

тивных особенностей, проявляющихся при создании продукции, ее эксплуатации или потреблении, которыми обусловлена пригодность ее удовлетворять определенным потребностям в соответствии с назначением.

Свойства (качества) эксплуатационные и потребительские (для трелевочного трактора: мощность, скорость, тяговое усилие, нагрузка на рейс, расход топлива); надежность; технологичность; показатели технической эстетики и эргономики; степень стандартизации, унификации и взаимозаменяемости. Надежность – важнейшая составляющая качества. Наука об измерении качества продукции называется квалиметрией. Показатель качества продукции – количественная характеристика.

Различают единичный или комплексный показатели – показатели, относящиеся только к одному из свойств продукции или к нескольким свойствам. Существует понятие интегрального показателя, т.е. показателя, отражающего суммарный полезный эффект от эксплуатации или потребления продукции и суммарные затраты на ее создание и эксплуатацию:

$$K = H/C,$$

где H – суммарный полезный эффект, полученный в результате эксплуатации изделия; C – затраты на создание и эксплуатацию; K – экономическая характеристика качества продукции.

### 1.3. Основные понятия и терминология

Основные понятия и термины надежности стандартизованы: ГОСТ 21623-76, ГОСТ 18322-78, ГОСТ 16504-81, ГОСТ 27.002-83.

Надежность характеризуется следующими основными понятиями.

Работоспособность – состояние изделия, при котором оно способно нормально выполнять заданные функции.

Исправность – состояние изделия, при котором оно удовлетворяет всем, не только основным, но и вспомогательным требованиям. Исправное изделие обязательно работоспособно.

Неисправность – состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. Трелевочный трактор неисправен, если произошло

снижение его производительности сверх допустимых пределов. Неисправное изделие может сохранять работоспособность, как например, задний мост трактора, имеющий изношенную шестерню. Мост производит шум, но его эксплуатационные показатели не вышли за пределы, установленные техническими условиями. Различают неисправности, не приводящие к отказам и приводящие к отказам.

Отказ - событие, заключающееся в полной или частичной утрате работоспособности. Различают отказы функционирувания и отказы параметрические.

Появление неисправности не всегда связано с возникновением отказа. Снижение мощности двигателя ниже установленного предела - отказ и автомобиль неисправен. Подтекание масла - неисправность, но не всегда отказ.

По происхождению отказы делятся на конструкционные, технологические и эксплуатационные.

Первые обусловлены несовершенством конструкции изделия (конструкцией валочно-пакетирующей машины, например, не предусмотрена защита агрегатов от возможности ударных нагрузок при валке деревьев). При этом возможно повреждение агрегатов и, как следствие - отказ.

Вторые - возникают в результате неправильного применения технологических процессов при изготовлении (отсутствии, например, термообработки, нарушение последовательности сборки при изготовлении, неправильный выбор материалов и т.д.).

Третьи - могут возникнуть как в нормальных условиях эксплуатации, так и при их нарушении (допущение перегрузок, неправильное включение рабочих органов машин и т.д.).

Причиной отказа может быть и нарушение правил технического обслуживания и ремонта. Отказы устраняют заменой деталей, регулированием или очисткой (электроконтакты, гидросистема, топливопроводы).

По сложности отказы делят на простые и сложные.

Простые отказы (обрыв или ослабление болтов и т.п.) устраняются с помощью инструмента и принадлежностей (постоянным комплектом).

Сложные отказы возникают из-за появления предельных

износов, трещин и т.д.

По характеру проявления различают постепенные и внезапные, самоустраниющиеся и устойчивые отказы. Постепенные отказы наступают в результате длительного, постепенного изменения параметров элементов. Им предшествуют стучи, нагрев и т.д. Наряду с механическим износом техника подвергается старению. Износ и старение – основные причины появления постепенных отказов. Их можно прогнозировать и предупреждать своевременной заменой деталей и узлов.

При внезапных отказах полная потеря работоспособности наступает неожиданно, мгновенно. Наступают они при нагрузках, превышающих прочность изделия.

Отказы могут быть самоустраниющиеся (например, высыхание увлажнившихся тормозов), устойчивые (увеличенный зазор в тормозах – устраняется персоналом), независимые (по любым причинам, но не вследствие другого отказа), зависимые (когда причиной его является другой отказ, как, например, неисправность свечи зажигания приводит к отказу в работе всей системы зажигания и двигателя в целом).

По последствиям различают опасные и безопасные отказы.

Надежность изделий обуславливается их безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Безотказность – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение заданной наработки. Это свойство особенно важно для машин, отказ в работе которых связан с опасностью для людей, с остановкой большого комплекса машин (например, отказ челостного погрузчика в системе лесосечных машин), с остановкой автоматизированной линии и т.д.

Долговечность – свойство изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. При достижении предельного состояния дальнейшая эксплуатация изделия невозможна вследствие снижения эффективности и безопасности. Для невосстанавливаемых изделий понятия безотказности и долговечности практически совпадают.

Ремонтпригодность – приспособленность изделий к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и

повреждений. Поддержание и восстановление работоспособности производится путем технического обслуживания и ремонтов. Это свойство важно с точки зрения огромных затрат на ремонт машин, так как от приспособленности конструкции оборудования к техническому обслуживанию и ремонту снижается время пребывания его в неработоспособном состоянии.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять показатели безотказности, долговечности и ремонтпригодности при хранении и транспортировании (особенно важно для приборов, а также периодически заменяемого оборудования – аккумуляторы).

Используют различные показатели надежности.

Для оценки безотказности рассматривают вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникает. Различают среднюю наработку до отказа и среднюю наработку на отказ. Первое – математическое ожидание наработки до отказа невозстанавливаемого изделия. Второе – отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Наработка – продолжительность или объем выполненной работы объекта.

Важный показатель – интенсивность отказов – показатель надежности восстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказавших в единицу времени объектов к числу объектов, оставшихся работоспособными.

Для восстанавливаемых изделий применяется параметр потока отказов – показатель надежности восстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки.

Основными показателями долговечности являются технический ресурс и срок службы изделия.

Технический ресурс – суммарная наработка изделия от начала его эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до предельного состояния. Различают ресурс до первого ремонта, межремонтный, назначенный, средний ресурс. Ресурс оговаривается в технической документации на оборудование. Ресурс выражается в единицах времени, пробегом и в единицах выпуска продукции.

Для восстанавливаемых изделий понятия ресурса и на-

работки до отказа совпадают.

Срок службы - календарная наработка до предельного состояния (измеряется обычно в годах). Для лесозаготовительных тракторов используют понятие технического ресурса в часах, для автомобилей и автопоездов - пробег в км.

Показатели долговечности разделяют на : гамма-процентные, средние до текущего (капитального) ремонта, полные, средние до списания. Гамма-процентные - имеют или превышают в среднем обусловленное число  $\gamma$  - процентов изделий данного типа. Гамма-процентный ресурс является, в частности, основным расчетным показателем подшипников качения, для которых наиболее часто используют 90%-ный ресурс. Если отказ представляет опасность для людей, принимают 100%-ный ресурс. Для агрегатов тракторов берут 80%-ный ресурс. Этот показатель может быть определен до завершения испытаний всех образцов, хорошо количественно характеризует случаи ранних разрушений. Гамма-процентный ресурс определяет долговечность при заданной вероятности сохранения работоспособности.

Показателями ремонтпригодности и сохраняемости служат: среднее время восстановления работоспособного состояния; вероятность восстановления работоспособного состояния в заданное время; сроки сохраняемости средний и  $\gamma$  -процентный.

Широко используются комплексные показатели:

коэффициент технического использования - отношение математического ожидания времени работоспособного состояния за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени работоспособного состояния и всех простоев для ремонтов и технического обслуживания;

коэффициент готовности - отношение математических ожиданий времени нахождения в работоспособном состоянии к математическим ожиданиям суммы этого времени и времени внеплановых ремонтов. Коэффициент готовности оборудования характеризует вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме периодов, в которых эксплуатация не предусматривается.

Для примера в табл. I приведены основные показатели

надежности тракторов ТБ-I с наработкой 2000 мото-часов по данным КарНИИЛП.

Таблица I

№ п/п	Показатели	Величина показателя	Размерность
1.	Наработка на отказ		
	I группа сложности	17,7	мото-часы
	II группа сложности	39,2	
	III группа сложности	300	
2.	Удельная трудоемкость технического обслуживания	94,2	чел.-час 1000 мото-часов
3.	Удельное время простоев при техническом обслуживании	69,8	часы 1000 мото-часов
4.	Удельная трудоемкость отказов	312,7	чел.-час 1000 мото-часов
5.	Удельное время простоев при устранении отказов	198,4	часы 1000 мото-часов
6.	Среднее время восстановления	2,5	часы
7.	Коэффициент готовности	0,866	
8.	Коэффициент технического использования	0,833	

## 2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость (ГОСТ 27.002-83) характеризуются количественными единичными и комплексными показателями. При эксплуатации лесозаготовительной машины внезапные отказы определяются случайными сочетаниями многих факторов. Рассеяние ресурсов по критериям усталости и износа, изменения действующих нагрузок, механических характеристик материалов деталей и узлов машин весьма значительно. Поэтому в расчетах надежности многие показатели должны рассматриваться как случайные величины.

Различают статистические (оценочные, приближительные)

и вероятностные (точные) показатели. Статистические оценки — это результат наблюдений за некоторой выборкой  $N$  изделий. Если  $N \rightarrow \infty$ , то выборка приближается к генеральной совокупности, а статистическая оценка — к вероятностной. Обычно стремятся выбирать  $N$  так, чтобы обеспечить нужную (приемлемую) погрешность.

Остановимся на единичных показателях надежности.

### 2.1. Показатели безотказности

К ним относятся: вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов, среднее число отказов, наработка на отказ, характеристика и параметр потока отказов.

При рассмотрении отказов как случайных событий используются такие характеристики, как плотность распределения (плотность вероятности) отказов  $f(x)$ , интегральная функция (вероятность) распределения отказов  $F(x)$ , вероятность безотказной работы (кривая убыли)  $R(x)$ .

$f(x)$  и  $F(x)$  связаны зависимостью:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}, \quad (I)$$

При наработке  $x$ , не превышающей требуемой  $x_1$ , с помощью плотности распределения определяется вероятность появления отказа, т.е.

$$P(x \leq x_1) = \int_0^{x_1} f(z) dz,$$

где  $z$  — переменная интегрирования.

Графически вероятность появления отказа за наработку  $x$ , меньшую требуемой  $x_1$ , равна площади под кривой  $f(x)$  слева от значения  $x_1$  (рис. I а).

Вероятность безотказной работы  $R(x)$ , т.е. величины противоположной  $F(x)$ , можно найти с помощью плотности распределения. Полагаем, что  $R(x_1) + F(x_1) = 1$ , т.е. изделие может быть только в одном из 2-х состояний — отказа или работоспособности. Тогда

$$R(x) = P(x > x_1) = 1 - F(x) = \int_x^{\infty} f(z) dz.$$

Вероятность безотказной работы равна площади под кривой  $f(x)$  справа от  $x_1$ , т.е. в этом случае наработка  $x$  до отказа будет больше требуемой  $x_1$ .

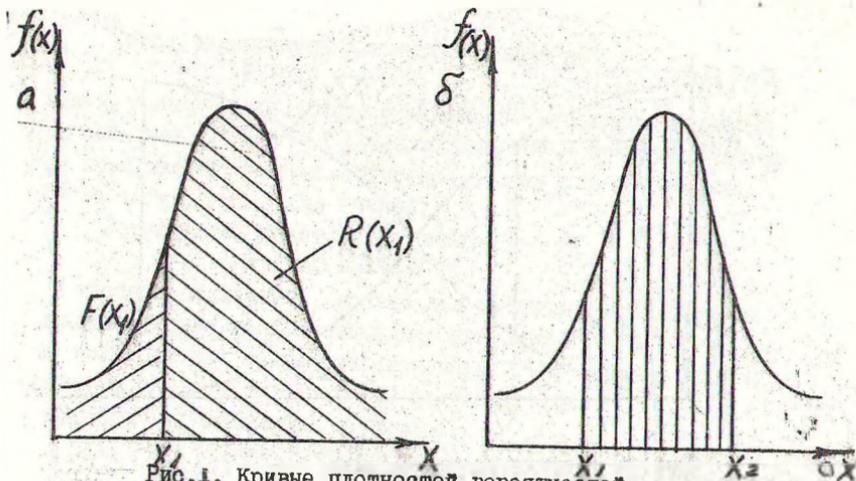


Рис. 1. Кривые плотностей вероятностей

Вероятность того, что величина  $X$  заключена между  $X_1$  и  $X_2$  (рис. 1 б)

$$P(X_1 < X < X_2) = F(X_2) - F(X_1) = \int_0^{X_2} f(z) dz - \int_0^{X_1} f(z) dz = \int_{X_1}^{X_2} f(z) dz.$$

Средняя наработка до отказа:

$$X_{ср} = \int_0^{\infty} z f(z) dz.$$

Приведенные формулы выражают связь между функциями распределения  $f(x)$ ,  $F(x)$ ,  $R(x)$ . Функции  $F(x)$ ,  $R(x)$  — интегральные, они могут быть представлены графиками (рис. 2).

Из рис. 2 по наработке  $X_i$  можно найти вероятность появления отказа (потери работоспособности)  $F(X_i)$  и вероятность безотказной работы  $R(X_i)$  при  $x < X_i$ .

Для ряда расчетов рассматривают функцию, называемую интенсивностью отказов (рис. 3):

$$\lambda(x) = f(x) / R(x).$$

При умножении интенсивности отказов на наработку  $\Delta x$  получаем долю элементов, которые безотказно работали до наработки  $x$  и, вероятно, выйдут из строя при наработках в пределах от  $x$  до  $x + \Delta x$ .

В зависимости от интенсивности отказов можно разделить наработку на три периода: I — приработка; II — нормальная эксплуатация;

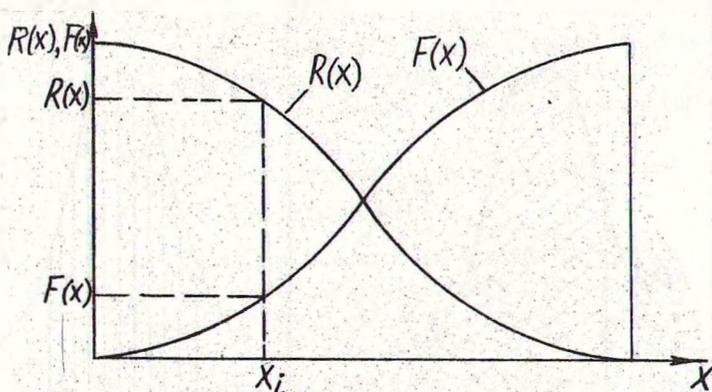


Рис.2. Функции распределения

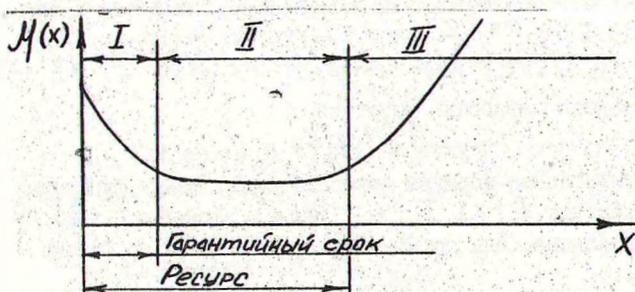


Рис.3. График изменения интенсивности

атация; III-выход в предельное состояние (рис.3).

В первый период интенсивность отказов повышена из-за ранних или приработочных отказов, обусловленных дефектами производства. Во второй период интенсивность отказов почти постоянна и близка к минимальной. В третий период начнутся отказы в результате интенсивного износа, усталостных разрушений, старения и др.

Для приближенного нахождения показателей безотказной работы, определяемых при испытаниях, необходимо знать их наработки до отказа или до конца наблюдений:  $X_1, X_2, \dots, X_n$

Тогда вероятность появления отказа ж

$$\bar{F}(X_0) = N' / N,$$

где  $X_0$  - наработка, когда отказало  $N'$  и сохранило работоспособность  $N'' = N - N'$  изделий (черточка сверху обозначает приближенную - статистическую оценку для показателя, буква та же, что и для точной).

Вероятность безотказной работы

$$R(X_0) = N'' / N.$$

Р удобный показатель, однако для высоконадежных изделий целесообразнее пользоваться вероятностью  $F = 1 - R$ . Можно пользоваться также относительными величинами - числом отказов на одно изделие, 100 изделий и т.д.

Средняя наработка до отказа

$$\bar{X}_c = \frac{\sum X_i}{N},$$

где  $\sum X_i$  - сумма наработки испытываемых объектов до отказа;

$N$  - число объектов.

Эта формула справедлива, если все  $N$  объектов отказывают, если же из  $N$  объектов за время  $t$  отказало  $z$  объектов, то

$$\bar{X}_c = \left[ \sum X_i + t(N-z) \right] / z.$$

Интенсивность отказов  $\lambda(x) = \Delta N / (\Delta x N)$ ,

где  $\Delta x$  - малая наработка;  $\Delta N$  - число отказавших объектов за наработку  $\Delta x$ ;  $N$  - число работоспособных объектов к началу рассматриваемой наработки.

Перечисленные показатели относятся к невозстанавливаемым объектам. В отличие от них у восстанавливаемых объектов после возникновения отказов происходит восстановление и их работа продолжается. Имеем  $N = \text{CONST}$ , число отказов  $m \leq N$  в потоке отказов и восстановлений. Потоки отказов необходимо знать как для оценки безотказности объекта, так и оценки потоков восстановления, что необходимо для расчета ремонтных средств, сопровождающих работу объектов.

Характеристики потока отказов: среднее число отказов

\* В связи с тем, что в литературе часто используют термин "вероятность" вместо "частота", в излагаемом ниже материале используется аналогичная терминология.

$m_c(x)$ ; параметр потока отказов  $\omega(x)$ .

Среднее число отказов

$$m_c(x) = \frac{I}{N} \sum m_i(x),$$

где  $x$  - наработка;  $N$  - число объектов;  $m_i(x)$  - число отказов каждого из  $N$  объектов.

Среднее число отказов при  $N \rightarrow \infty$  стремится к пределу  $H(x)$ .  $H(x)$  назовем характеристикой потока отказов, которая зависит от периода эксплуатации объекта

$$H(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} m_c(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum m_i(x).$$

Функция  $H(x)$  при нормальной эксплуатации возрастает, а в период приработки может убывать. Интенсивность изменения характеристики потока отказов во времени - параметр потока отказов  $\omega(x)$ , определяющий среднее число отказов в единицу времени вблизи наработки  $x$ , равен

$$\omega(x) = \frac{dH(x)}{dx}.$$

Можно записать

$$\omega(x) = \frac{\sum m_i(x+\Delta x) - \sum m_i(x)}{N \Delta x} = \Delta m / N \Delta x. (2)$$

С учетом вероятности  $F(x)$  появления отказа в интервале от  $x_1$  до  $x_2$  параметр потока отказов

$$\omega(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

Таким образом, параметр потока отказов за наработку  $x$  равен вероятности отказа объекта на единицу наработки в единицу времени.

Суммарный поток отказов для сложных изделий равен сумме потоков отказов составляющих элементов:

$$m_{co}(x) = m_{c1}(x) + m_{c2}(x) + \dots + m_{cn}(x).$$

После дифференцирования по  $x$  получим параметр суммарного потока отказов:

$$\omega(x) = \omega_1(x) + \omega_2(x) + \dots + \omega_n(x).$$

Видно, что он равен сумме параметров составляющих потоков. Для транспортных машин определяют параметры потока отказов с учетом наработки с начала эксплуатации (размерность параметра потока равна размерности наработки - 1 ч, 1 км, 1 м<sup>3</sup>

и т.д.). Общее уравнение для определения наработки на отказ для периода  $X_1 - X_2$

$$X = (X_1 - X_2) / [H(X_2) - H(X_1)] \approx (X_2 - X_1) / [m_c(X_2) - m_c(X_1)] \quad (3)$$

Стационарный поток (число отказов зависит от величины наработки  $X_1 - X_2$  и не зависит от величины  $X_1$  или  $X_2$ ) - распространенный вид потока отказов. Это характерно для периода нормальной эксплуатации. Для приработки - не характерно.

Характеристика потока  $H(X)$  в период II (рис.3) - линейная функция  $H(X) \approx H(X_0) + \omega(X - X_0)$ ,

где  $X_0$  - наработка, соответствующая времени приработки.

Для стационарного потока  $\omega \approx const$ , но для того, чтобы  $H(X)$  было линейным, отказы должны возникать по одному и не обуславливать взаимного их появления, т.е. должно соблюдаться требование ординарности без последействия - при любой наработке одновременно возникает не более одного отказа. Должен также соблюдаться принцип последействия: отказ одних элементов не должен вызывать отказ других и менять параметры потока. Но это не всегда справедливо, особенно в случае перенапряжения конструкций, когда появляются скрытые повреждения, приводящие к отказам позже.

В случае, когда для каждого значения параметра  $X = X_0$ , вероятность любого состояния системы в будущем для интервала наработки от  $X_0$  до  $(X_0 + \Delta X)$  зависит только от состояния системы в начальный момент и не зависит от того, каким образом система пришла в это первоначальное состояние, то такой случайный процесс называется марковским (или процессом без последействия).

Понятия интенсивности отказов  $\lambda(X)$  для невозстанавливаемого объекта и параметра потока отказов  $\omega(X)$  для восстанавливаемого объекта родственны. В случае ординарного потока без последействия они совпадают, при этом многие выражения упрощаются. Например, для наработки вместо выражения (3), с учетом упрощения уравнения (2), будем иметь  $X = I/\omega$ .

Таким образом, возможно существенное различие параметров безотказности различных объектов. Например, у невозстанавливаемого - вероятность безотказной работы с

наработкой падает, а у восстанавливаемого может в среднем сохраняться, что является следствием замены при наработках  $L_i$ .

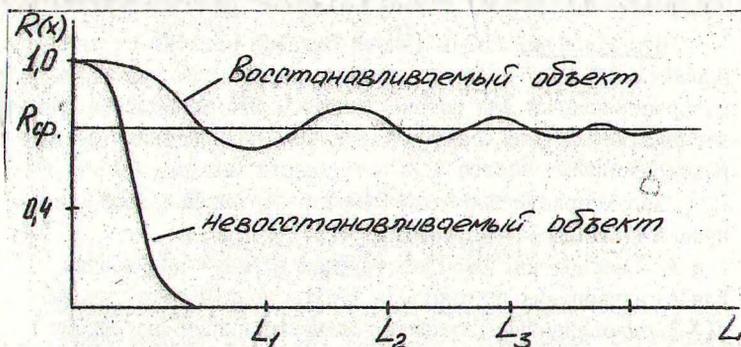


Рис. 4. Зависимости вероятности безотказной работы от наработки

Значение  $R_{cp}$  характеризует средний уровень безотказности, его значение больше, если лучше организована эксплуатация. Если кривые  $R(x)$  для невосстанавливаемого объекта характеризуют его долговечность, то для восстанавливаемого — кроме того, и организацию эксплуатации (замен, восстановлений и т.д.).

## 2.2. Показатели долговечности

Долговечность оценивается по ресурсу (наработке) и по сроку службы (год, месяц). Разница между этими показателями состоит в том, что ресурс учитывает фактическую наработку (например пробег автомобиля), а срок службы — суммарную продолжительность работы с включением простоев. Поэтому два одинаковых изделия могут иметь одинаковый ресурс на разные сроки службы. На рис. 5 показаны применяемые для определения показателей долговечности кривые убыли объектов (а) и распределения ресурса (б).

Показатели долговечности: гамма-процентный ресурс  $X_\gamma$  (срок службы); медианный  $X_{med}$ , т.е.  $\delta$ -процентный ресурс  $X_{50}$  при  $\delta = 50\%$ ; средний ресурс, т.е. среднее значение для совокупности объектов; назначенный, т.е. ресурс, при котором эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния объекта; ресурс до I-го капремонта; ресурс до спи-

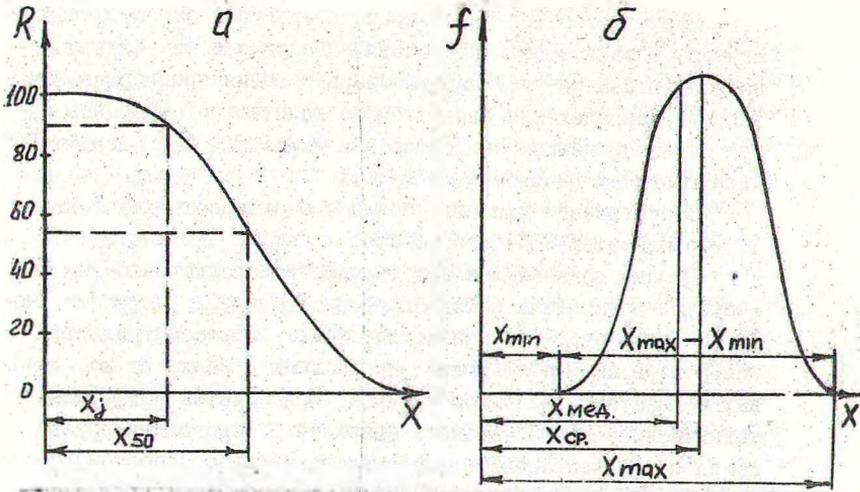


Рис. 5. Кривые убыли (а) и распределения ресурсов (б)

сания -  $\chi_{пр}$ ; минимальный  $\chi_{min}$  ресурс, в течение которого нет ни одного отказа.

Гамма-процентный ресурс характеризует ранние отказы, срок гарантии, потребность в запасных частях, минимальную долговечность объекта и является одним из основных показателей надежности машин.

Средний ресурс  $\chi_{cp}$ , учитывающий долговечность всех объектов, в том числе и соответствующих крайним значениям ресурса, важен для расчетов: расхода запасных частей и агрегатов, планирования убыли и пополнения парка машин, числа ремонтов, эффективности эксплуатации и ремонта оборудования и т.д. Для невозстанавливаемого объекта исходная зависимость для определения показателей долговечности - кривая убыли (рис. 5, а). По ней задаются показатели  $\chi_{min}$ ,  $\chi_j$ ,  $\chi_{пр}$ .

В условиях эксплуатации для восстанавливаемого объекта ресурсы до капитального ремонта и до списания, а также межремонтный период определяются специальными условиями. Так, например, при агрегатно-узловом методе ремонта грузовой автомобиль считается вышедшим в капитальный ремонт, если 5 или 6 основных агрегатов требуют ремонта (двигатель, коробка передач, мости и др.).

Нормативное (среднее) значение ресурса автомобиля, например, в зависимости от условий движения может сильно меняться (в два раза). Размахи варьирования при нормальном законе распределения наработок до капитального ремонта могут быть определены зависимостями  $X_{\min} = 0,4 X_{\text{ср}}$ ;  $X_{\max} = X_{\text{ср}} \cdot 1,6$  (при границах ресурса  $X_{\text{ср}} = 2 X_{\text{б}}$ ).

Теоретически для автомобиля в благоприятных условиях (с вероятностью 90%) ресурс составляет 90-370 тыс.км.

Помимо показателей безотказности и долговечности, существуют показатели ремонтпригодности и сохраняемости, которые здесь не рассматриваются, т.к. они рассматриваются подробно в соответствующих специальных курсах. Из комплексных показателей надежности широко применяется коэффициент технического использования, значение которого для группы машин позволяет оценить вероятность их работоспособного состояния в плановом обслуживании и ремонте. Он равен

$$k_{\text{ТИ}} = \frac{t_{\text{сум}}}{t_{\text{сум}} + t_{\text{р}} + t_{\text{то}}}$$

где  $t_{\text{сум}}$  - суммарная наработка;  $t_{\text{р}}$  - простой в ремонтах;  $t_{\text{то}}$  - простой в технической обслуживании.

Если  $k_{\text{ТИ}} = 0,9$ , то это значит, что 90% оборудования работоспособны, а 10% находится в плановом ТО и ремонте.

### 2.3. Надежность и законы распределения случайных величин

Наблюдения при испытаниях или эксплуатации осуществляются по специальному плану. Это нужно для оценки надежности изделий. Могут быть два случая: известна статистическая модель объекта с ее законами распределения случайной величины; статистическая модель неизвестна.

В последнем случае можно определить непосредственно числовые значения (точечные оценки) показателей надежности: средние (наработка до отказа, ресурс, срок службы, срок сохраняемости, время восстановления); гамма-процентные (ресурс, срок службы, срок сохраняемости); вероятности безотказной работы, интенсивности отказов.

Часто встречается другая задача, когда известна статистическая модель и необходимо найти характеристики надежности системы, т.е. характеристики распределения наработки до от

каза и других случайных величин, определяющих надежность изделия, например, плотность распределения  $f(x)$  и др. Исходными данными для определения распределения является обычно наблюдаемые значения случайной величины, сгруппированные по частоте появления, т.е. эмпирическая плотность распределения. При обработке построенной гистограммы переходят от эмпирического распределения к той или иной статистической модели и подбирают то или иное распределение. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся распределения.

Экспоненциальное распределение - распространенная модель для времени безотказной работы. Оно удобно для описания несистемных отказов, т.к. предполагается, что события (отказы) происходят независимо одно от другого. Экспоненциальное распределение часто успешно может быть применено, когда каждый отказавший элемент немедленно заменяется работоспособным. Экспоненциальное распределение является однопараметрическим, т.е. зависит от одного параметра  $\lambda$  - интенсивности отказов.

Плотность распределения отказов

$$f(x, \lambda) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda x) & \text{при } x \geq 0, \lambda \geq 0; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Интегральная функция распределения отказов

$$F(x, \lambda) = \int_0^x \lambda \exp(-\lambda z) dz = 1 - \exp(-\lambda x).$$

Функция безотказной работы

$$R(x, \lambda) = 1 - F(x, \lambda) = \exp(-\lambda x).$$

Интенсивность отказов

$$\lambda(x) = \frac{\lambda \exp(-\lambda x)}{\exp(-\lambda x)} = \lambda = \text{const.}$$

Постоянство  $\lambda$  предполагает независимость вероятности отказа элемента от его предыстории. Например, прокол шины в равной степени вероятен после 5 или 10 тыс. км пробега, удар падающего дерева при валке в равной степени вероятен как после 5, так и после 20 часов работы валочно-пакетирующей машины.

Если не имеется отказов в течение наработки  $X_0$ , то

$$f(x, \lambda, X_0) = \begin{cases} \lambda \exp[-\lambda(x - X_0)] & \text{при } x \geq X_0, \lambda \geq 0; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

При этом: средняя наработка (матожидание) до отказа  $\chi_{cp} = 1/\lambda$ , гамма-процентный ресурс  $P(\chi_j) = \exp(-\lambda \chi_j) = 0,01j$ , откуда после логарифмирования будем иметь  $\chi_j = -(\ln 0,01j)/\lambda = \chi_{cp}(-\ln 0,01j)$ .

Наиболее часто используемая статистическая модель - нормальное (или гауссово) распределение. Плотность нормального распределения

$$f(x, m_x, \sigma) \approx \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m_x)^2}{(2\sigma)^2}\right]$$

при  $0 < x < \infty$ ;  $0 < m_x < \infty$ ;  $\sigma > 0$ ,

где  $m_x$  - среднее значение или матожидание (характеризуют центр распределения),  $\sigma$  - среднее квадратичное отклонение случайной величины  $X$ .

Интегральная функция при условии  $m_x > 3\sigma$

$$F(x, m_x, \sigma) \approx \int_0^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z-m_x)^2}{(2\sigma)^2}\right] dz.$$

Функция безотказной работы

$$R(x, m_x, \sigma) = F_0\left(\frac{m_x - x}{\sigma}\right),$$

где  $F_0(z) = \int_{-\infty}^z 1/(\sqrt{2\pi}) \exp(-0,5t^2) dt$  - табулированная функция.

По смыслу наработка до отказа может быть только положительной, поэтому приведенные выражения справедливы, когда  $\sigma < m_x/3$  или коэффициент вариации  $V = \sigma/m_x < \frac{1}{3}$ , т.е. при достаточно малых  $\sigma$ .

В случае логнормального распределения логарифм случайной величины распределен по нормальному закону. Это распределение может приниматься в качестве распределения времени безотказной работы. Если нормальное распределение имеет место при сложении погрешностей, то логарифмически-нормальное распределение предполагает, что случайная величина получается в результате перемножения большого числа небольших погрешностей. Оно может описать самые различные случайные процессы.

Если  $Z = \ln x$ , то плотность распределения будет

$$f(x, m_x, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x - m_x)^2\right] & \text{при } x > 0, -\infty < m_x < \infty, \sigma > 0; \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

При появлении отказов только после некоторого значения  $x_0$  плотность распределения определяется выражением

$$f(x, m, \sigma) = \frac{1}{\sigma(x-x_0)^{2\sigma}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [\ln(x-x_0) - m]^2\right\} \text{ при } x \geq x_0, \sigma > 0.$$

Более универсальным является распределение Вейбулла.

Распределение Вейбулла - двухпараметрическое, плотность его

$$f(x, a, \nu) = \begin{cases} (\nu/a)(x/a)^{\nu-1} \exp[-(x/a)^\nu] & \text{при } x \geq 0, a > 0, \nu > 0; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где  $a$  - параметр масштаба;  $\nu$  - параметр формы, характеризующий рассеяние случайной величины.

Интегральная функция распределения отказов равна

$$F(x, a, \nu) = \int_0^x (\nu/a)(z/a)^{\nu-1} \exp[-(z/a)^\nu] dz = 1 - \exp[-(x/a)^\nu] \text{ при } x > 0.$$

При произвольном начале отсчета имеем

$$f(x, a, \nu, x_0) = \begin{cases} \nu/a \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^{\nu-1} \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^\nu\right] & \text{при } x \geq x_0, -\infty < x < \infty, a > 0, \nu > 0; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Имеется в виду, что при имеющейся наработке  $x_0$  отказы не наступают. Функция безотказной работы, интенсивность отказов и средняя наработка до отказа определяются выражениями:

$$R(x, a, \nu, x_0) = \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^\nu\right] \text{ при } x \geq 0;$$

$$\lambda(x) = \nu/a (x/a)^{\nu-1};$$

$$\lambda_{\text{ср}} = a \Gamma(1-1/\nu),$$

где  $\Gamma$  - гамма-функция (принимается по справочным данным)

Гамма-процентный ресурс равен

$$j = 100 \exp - (x_j/a)^\nu.$$

Распределение Вейбулла может соответствовать различным случаям изменения вероятности отказов: при  $\nu < 1,0$  плотность распределения имеет вид убывающей функции; при  $\nu = 1$  - совпадает с экспоненциальным,  $\lambda = 1/a = \text{const}$ ; при  $\nu > 1$  - плотность одновыпуклая,  $\lambda(x)$  возрастает с течением времени; при  $\nu = 2$  -  $f(x)$  линейная функция; при  $\nu = 3, 3+3, 5$  - распределение близко к нормальному (рис.6).

Если известны лишь общие характеристики случайной величины  $x_{\text{ср}}$  и  $x_{\sigma}$ , а необходимо найти закон ее распределения, то для этого используют коэффициент вариации

$$V = x_{\sigma} / x_{\text{ср}},$$

а по значению  $V$  можно предварительно оценить, среди каких законов распределения находится искомый. В результате обобщений по технической эксплуатации автомобилей установлены

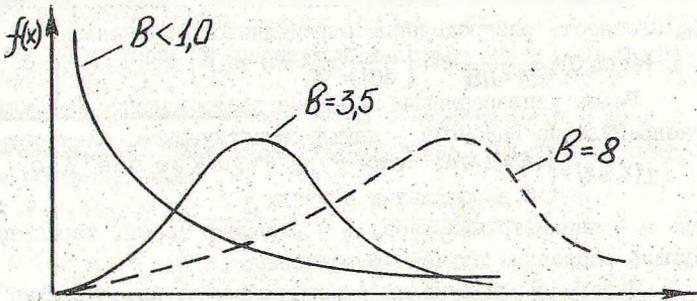


Рис. 6. Плотность распределения Вейбулла

средние значения коэффициентов вариации при различных законах распределения: нормальный  $\nu = 0,25$ ; Вейбулла  $\nu = 0,44$ ; лонгнормальный  $\nu = 0,68$ .

Для сложных изделий, включающих элементы с различной природой отказов, возникает необходимость найти закон распределения как сочетание различных распределений. Для таких случаев может быть сформулирована следующая задача. Независимые случайные величины  $X_1, X_2 \dots X_n$  заданы плотностями распределения  $f(x_1), f(x_2), \dots f(x_n)$ . Сложная величина

равна сумме независимых случайных величин  $X = X_1 + X_2 + X_3 \dots X_n$ . Эта сумма является случайной величиной с искомой плотностью  $f(x)$ . Соответствующий ей закон распределения является композицией законов  $f(x_1), f(x_2) \dots f(x_n)$ . Матожидание и дисперсия композиции равны суммам матожиданий соответствующих характеристик независимых случайных величин. Для среднего квадратического отклонения будем иметь:

$$\sigma(x) = \sqrt{\sigma^2(x_1) + \sigma^2(x_2) + \sigma^2(x_3) \dots}$$

### 3. ПРИЧИНЫ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ НАДЕЖНОСТИ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

#### 3.1. Причины потери работоспособности

Процессы, предопределяющие отказы и потерю работоспособности оборудования, протекают непрерывно и являются следствием эксплуатационных нагрузок на детали и узлы, износных и химических явлений, нарушением регулировок и креп-

лений.

Анализ надежности лесозаготовительной машины ТБ-1 в условиях Коми и Карельской АССР показал, что наибольшее число отказов приходится на гидросистему (35-40%) и технологическое оборудование (25-30%). Установлено, что одной из причин отказов является недостаточная прочность деталей (65-70%). На технологическое оборудование и гидросистему приходится более половины отказов по поломкам и трещинам (трещины в передней консоли стрелы, трещины по сварочным швам рукояти и стрелы, трещины трубопроводов высокого давления и т.д.).

Общие причины отказов: 1) разрушение из-за усталости материала и снижения прочности; 2) изменение размеров и формы деталей из-за износа; 3) деформация и заклинивание подвижных сопряжений из-за пиковых нагрузок; 4) разрушения и повреждения из-за коррозии; 5) совместное действие нагрузки, износа и химически активных сред.

Нарушение регулировок (клапанный механизм, зацепление в редукторе и т.д.), нарушение креплений агрегатов (головки блока, редуктора рулевого управления) - также причины частых отказов.

**Усталостные разрушения** начинаются с появления трудно обнаруживаемых микроскопических трещин, причем максимальные динамические нагрузки, их вызывающие, меньше, чем при статическом разрушении.

Следует все же иметь в виду, что наиболее частой причиной отказов является износ трущихся элементов деталей машин. Внешнее трение и износ возникает при относительном перемещении сопряженных поверхностей деталей.

Внешнее трение возникает, например, между поверхностью дороги и двигателем машины. За счет него возникают внешние силы, движущие автомобиль или трактор или вызывающие их торможение. В этом смысле внешнее трение полезно. Но при этом возникает и износ шин колес или гусениц - в этом смысле оно вредно. Кроме того, имеются и затраты энергии на преодоление сил трения. Износ ходовой части и других агрегатов и деталей имеет решающее влияние на долговечность и эксплуатационную надежность оборудования.

Выделяют три периода, характеризующие динамику процесса изнашивания деталей: I - период приработки; II - период нормального изнашивания; III - период аварийного износа (см. рис. 7).

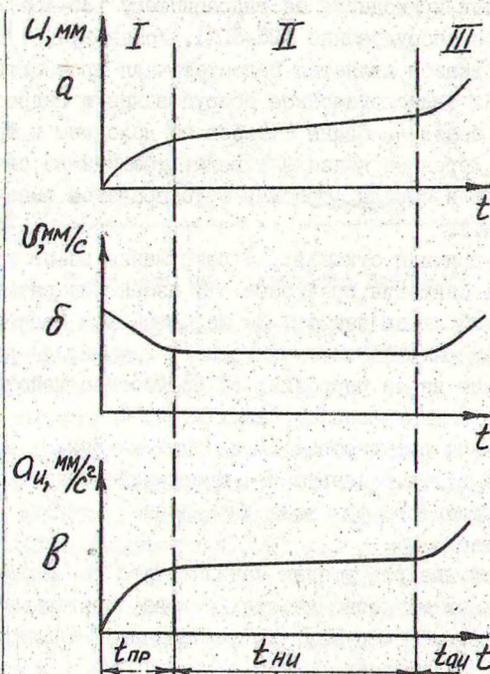


Рис. 7. Общие закономерности изнашивания;  
 $a - u(t)$ ;  $\delta - v(t)$ ;  $b - a_u(t)$   
 ( $u$  - абсолютный износ;  $v$  - скорость изнашивания;  $a_u$  - ускорение изнашивания;  $t_{пр}$  - время приработки;  $t_{ни}$  - время нормального изнашивания;  $t_{авт}$  - время аварийного изнашивания).

В первый период имеется довольно интенсивный износ, но скорость его увеличения снижается, проявляются приработочные отказы  $m$ , а интенсивность  $\lambda$  постепенно снижается.

### 3.2. Общие сведения о трении

Выделяются две группы деталей по условиям изнашивания: детали взаимного трения в сопряжениях; детали, трущиеся при взаимодействии их со средой или обрабатываемым материалом.

Взаимодействие поверхностей трения приводит к образованию поверхностных связей, их разрушению. Происходит упругопластическая деформация поверхностных слоев трущихся деталей. В результате возникают и развиваются вторичные физические, химические и механические процессы.

Основная характеристика внешнего трения - сила трения

$$F = f \cdot N,$$

где  $f$  - коэффициент трения;  $N$  - нормальная сила.

Согласно Кулону, который указал на двойственную природу трения,  $F = A + f N$ ,

где  $A$  - коэффициент, учитывающий сопротивление от сцепляемости поверхностей трения.

По атомно-молекулярной теории трения

$$F = f S_{\phi} (P_0 + P),$$

где  $S_{\phi}$  - площадь фактического контакта;  $P_0$  - удельная сила молекулярного взаимодействия;  $P$  - нормальное давление.

Согласно молекулярно-механической теории трения.

$$F = \tau_{\text{мех}} + \tau_{\text{мол}} = \alpha S_{\phi} + \beta P,$$

где  $\tau_{\text{мех}}, \tau_{\text{мол}}$  - составляющие сил трения механического и соответственно молекулярного происхождения;  $\alpha$  и  $\beta$  - коэффициенты, определяемые опытным путем.

По гидродинамической теории трения

$$F = \nu S \dot{\gamma} / h,$$

где  $\nu$  - абсолютная вязкость масла;  $\dot{\gamma}$  - относительная скорость перемещения трущихся поверхностей;  $S$  - площадь поверхностей, скользящих одна относительно другой;  $h$  - толщина масляного слоя.

Общая сила внешнего трения

$$F_{\text{общ}} = \nu_1 F_{\text{м}} + \nu_2 F_{\text{г}} + \nu_3 F_{\text{а}},$$

где  $F_{\text{м}}$  - составляющая механического взаимодействия шероховатостей поверхностей трения;  $F_{\text{г}}$  - составляющая, вызываемая деформацией поверхностного слоя;  $F_{\text{а}}$  - составляющая атомно-молекулярного взаимодействия;  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  - коэффициенты, учитывающие действие сил химического происхождения.

Таким образом, сложные явления трения и изнашивания определяются с учетом комплекса механических, физических и химических процессов. Эти явления, а следовательно, и

износ деталей машин зависят от качества трущихся поверхностей.

Показатели качества поверхностей: форма, волнистость, шероховатость, твердость, теплостойкость, химическая стойкость, напряженность состояния.

Геометрия поверхности деталей зависит от вида механической обработки; внутреннего строения и нагружения при эксплуатации.

Технологический рельеф, обусловленный технологией обработки, быстро исчезает при приработке. В процессе эксплуатации формируется рабочий рельеф.

Имеют значение физико-механические свойства и напряженное состояние поверхностных слоев, толщина которых находится в пределах от десятков ангстрем до сотых и десятых долей миллиметра. Эти слои имеют, как правило, структуру и свойства, отличные от основного материала детали. Это зависит от свойства адсорбционной активности, суммы механических, тепловых и физико-химических воздействий при технологической обработке, от циклических воздействий при нагружении в эксплуатационных условиях.

При обработке детали преследуется цель создания заданных размеров, формы, шероховатости и твердости ее поверхности. Если дополнительно учесть направление шероховатости, толщину поверхностного слоя и его физико-химико-механические свойства, а также условия работы детали, то можно значительно сократить период приработочных отказов и повысить долговечность. Если детали дополнительно подвергнуть специальной технологической обработке, то долговечность сопряжения значительно повысится. Например, при упрочнении поверхности ряда трущихся деталей двигателя термодиффузионным хромированием повышается долговечность сопряжения. Такая обработка регулировочного болта толкателя топливного насоса повышает его долговечность в 10 раз.

### 3.3. Классификация видов трения и изнашивания

Различают (в зависимости от состояния трущихся поверхностей) трение покоя (трение при предварительном смещении) ; трение движения (рис.8).

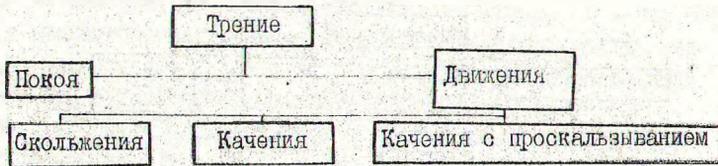


Рис.8. Схема классификации трения по характеру относительного перемещения деталей.

В зависимости от характера относительного движения двух тел существуют следующие виды трения: трение скольжения (трение первого рода - скорости точек соприкосновения различны по величине и направлению); трение качения (второго рода - скорости соприкосновения точек одинаковы); трение качения с проскальзыванием (трение третьего рода); сухое трение (трение без смазки); граничное трение (на поверхности трения слой смазочного материала); жидкостное трение (поверхности трения разделены смазочным материалом, проявляющим объемные свойства).

Различают износ и изнашивание. При износе происходит отделение или остаточная деформация материала. При изнашивании имеет место постепенное изменение размеров тела при трении, проявляющееся в отделении в поверхности трения материалов и в его пластической деформации. Изнашивание может сопровождаться коррозией.

Различают (рис.9) изнашивание механическое, молекулярно-механическое; коррозионно-механическое. Виды механического изнашивания:

- абразивное - воздействуют твердые частицы;
- гидроабразивное - твердые частицы удаляются жидкостью;
- газоабразивное - твердые частицы удаляются газом;
- усталостное - изнашивание в результате повторного деформирования микрообъемов материала, приводящего к возникновению трещины и отделению частиц;
- эрозионное - изнашивание газом или жидкостью;
- кавитационное - под действием сильных ударов жидкости в виде кумулятивных срывов.

Молекулярно-механическое изнашивание происходит в результате однообразного воздействия механических и ато-

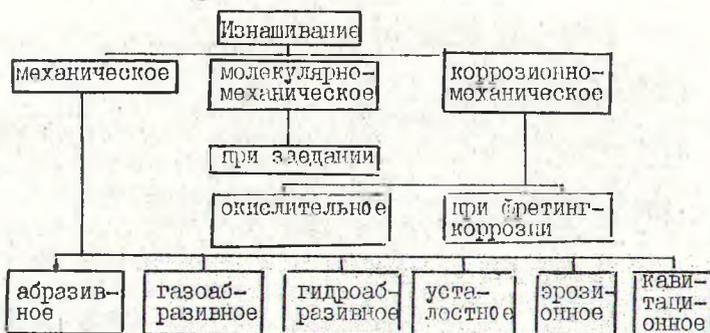


Рис.9. Классификация видов изнашивания.

марных сил. Его подвид – изнашивание при заедании (схватывание, глубинное вырывание материала, перенос его с одной поверхности на другую). При коррозионно-механическом изнашивании имеет место одновременно пластическая деформация поверхностного слоя и его физико-химическое взаимодействие со средой (окислительное – образование пленок окислов, fretting-коррозия – присутствуют малые колебательные перемещения, когда окислы играют роль абразивных частиц).

Изнашивание характеризуется следующими количественными характеристиками:

1. Скорость изнашивания (отношение величины износа к времени).
2. Интенсивность изнашивания (отношение величины износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание).
3. Износостойкость (величина обратная 1 или 2).
4. Относительная износостойкость (отношение износостойкости испытываемого материала и материала, принятого за эталон).

### 3.4. Закономерности изнашивания

Процесс изнашивания – сложный случайный процесс. И до настоящего времени нет основного уравнения для процесса износа. В общем виде можно записать:

$$M = \int_0^t f(M, V, n, c) dt,$$

где  $I$  - износ;  $M$  - характеристика материала;  $B$  - характер взаимодействия (род и вид трения, форма контакта, чистота поверхности и др.);  $H$  - внешние нагрузки (давление, скорость и др.);  $C$  - характеристика рабочей среды (газовая среда и ее свойства, смазка и ее свойства, температура, давление и т.д.);  $t$  - время процесса изнашивания.

Для абразивного износа характерны следующие закономерности:

1. Величина износа прямо пропорциональна пути трения;

2. Скорость изнашивания прямо пропорциональна скорости трения

$$\frac{dh}{dt} = c N v,$$

где  $h$  - величина износа;  $c$  - коэффициент пропорциональности;  $N$  - нормальная нагрузка;

3. Величина износа прямо пропорциональна величине  $N$

$$\frac{dh}{ds} = c N,$$

где  $s$  - длина пути скольжения.

При изменении соотношения твердости абразива и металла характер износа существенно меняется, при  $H_m/H_a < 0,6$  ( $H_m, H_a$  - соответственно твердость металла и абразива) они зависят линейно.

Относительная износостойкость  $\epsilon = \frac{h}{H_t}$ , где  $\frac{1}{\epsilon}$  - коэффициент пропорциональности,  $H_t$  - твердость. Но это соотношение характерно для технически чистых металлов в ненаклепанном состоянии и сталей в отожженном состоянии. Для конструкционных углеродистых и легированных сталей зависимость другая.

### 3.5. Методы определения износа

Испытания на трение и износ проводят в 4 этапа: лабораторные испытания физико-механических свойств материала; лабораторные испытания для оценки влияния различных факторов на износ материалов; стендовые испытания для оценки новых разработок; натурные испытания для определения надежности работы механизмов или машин в целом.

Методы определения износа подразделяются на методы периодического определения износа и методы измерения износа в процессе испытаний без остановок машины.

Периодическое определение износа производится путем микрометрических измерений (точность 0,01-0,001 мм, микрометры, микроскопы и т.д.); по потере массы (взвешивание, точность (0,05-5)10<sup>-6</sup> г); путем профилографирования (снятие профилограмм); методом искусственных баз (делают углубления и вычисляют расстояние от поверхности трения до дна углубления).

В процессе испытаний без остановки оборудования износ измеряют: по содержанию продуктов износа в отработанном масле (в основном на стендах); при помощи радиоактивных изотопов; при помощи пневматического микрометрирования (измерение давления сжатого воздуха в цилиндре при изменении расстояния между выходным отверстием и поверхностью износа); по расходу рабочей среды (измерение щели между трущимися парами пневматическим или жидкостным калибратором); при помощи рычажных приспособлений и индикаторов часового типа (микронный индикатор устанавливается подвижно и с натягом); индуктивными датчиками; тензометрическим микрометрированием (деформация тензобалок).

### 3.6. Расчет деталей на износ

Для определения интенсивности износа  $J$  могут быть использованы выражения:

$$\text{для упругого контакта} \quad J = 0,7 \frac{P_a}{E n};$$

для пластического контакта

$$J = \frac{0,07}{n} \sqrt{h_{\max}/2} \frac{P_a}{C \sigma_s}$$

где  $J$  - интенсивность износа;  $P_a$  - номинальное давление;  $E$  - модуль упругости;  $n$  - число циклов до разрушения;  $h_{\max}$  - максимальная высота неровностей трущейся поверхности;  $2$  - средний радиус кривизны вершин неровностей;  $\sigma_s$  - предел текучести;  $C$  - коэффициент упрочнения металла,  $C \approx 3,0$ .

### 3.7. Определение износа машины

Износ машины в целом определяют аналитическим или графическим методами, исходя из износа каждого элемента. При этом принимается во внимание общий фонд изнашивания элементов машины за полный срок ее службы.

При применении аналитического метода общий показатель износа (%) машины может быть определен по формуле:

$$P_{m, \text{ сум. х}} = \sum_1^S n_{ix} \left( \frac{\Delta_{im, a}}{\sum_1^k \Delta_{im}^k \cdot P_{ix}^k} \cdot 100 + \sum_1^k \Delta_{im}^k \cdot 100 \right) + \sum_1^S (\Delta_{im, a} P_{iax} + \Delta_{im}^k \cdot P_{ix}^k),$$

где  $\Delta_{im, a}$  и  $\Delta_{im}^k$  - доли износа соответствующего элемента в общем фонде изнашивания любой машины за срок ее службы, относящиеся к активнорействующей его годности;  $S$  - число укрупненных элементов машины с исходной годностью  $F_m$ ;  $P_{iax}$  и  $P_{ix}^k$  - фактический частичный износ соответствующего исходного и отремонтированного элемента машины, устанавливаемый по данным наблюдений.

Предлагается, что за срок службы  $T$  укрупненные элементы машины сменяются или возобновляются  $(k_i - 1)$  раз. Срок  $t_i$  они служат лишь при условии, что каждый из них периодически ремонтируют или частично возобновляют  $(m_i - 1)$  раз.

Графический метод основан на построении и анализе графика суммированного износа машины, состоящей из элементов, сменяемых или полностью возобновляемых в разные сроки службы.

### 3.8. Разрушения и повреждения деталей и оборудования при отсутствии трения

Пластическое деформирование может быть в виде изгиба, скручивания, смятия. Эти разрушения и повреждения происходят под действием силовых (статических и динамических) и тепловых нагрузок, когда напряжения в материале превышают предел текучести или предел прочности (рамы тракторов, автомобилей, кузова, элементы манипуляторов и др.). В чугунных и стальных корпусных деталях (коробка передач, главная передача, блоки двигателя и др.) при воздействии внешних нагрузок, вибрации, нагрева происходят процессы старения и в связи с этим перераспределения внутренних напряжений, вследствие чего эти детали изгибаются, коробятся, разрушаются на части.

Пластическую деформацию могут иметь шейки валов под подшипники, места запрессовки и т.д. (резьба, заклепки, шпонки и т.д.). Это приводит к интенсивному изнашиванию сопряженных деталей.

Усталостные разрушения происходят в таких деталях, как коленчатые валы, рессоры, пружины, шатуны, несущие знакопеременные нагрузки. Они разрушаются на части вследствие износа. Усталостная прочность снижается при несоблюдении радиусов перехода, наличии рисок, раковин и т.п.

Сущность теплового разрушения состоит в том, что под действием тепловых нагрузок происходят процессы разрушения структуры металла (материала) и они теряют свои служебные свойства (головки цилиндров, поршни, цилиндры и т.д.).

В деталях, которые подвержены искровым разрядам (свечи зажигания, контакты распределителя - прерывателя, реле регулятора и т.д.), происходит электрокоррозионное разрушение.

Для ряда деталей машин возможна потеря приданных им служебных свойств, как, например, потеря магнитных свойств ротора магнето, генераторов и других намагниченных деталей, потеря упругости рессор, подвески машин и др.

Химическая коррозия происходит при соприкосновении деталей с химически активными газами (газотрубопроводы и др.).

Электрохимическая коррозия имеет место при неоднородности деталей и попадании на них кислот, вследствие возникновения электролитического процесса.

Ряд деталей машин подвергается сочетанию коррозии, трения, ударов, переменных нагрузок и т.д. В этом случае происходят комбинированные виды разрушений.

#### 4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛЕСНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ

##### 4.1. Вероятность безотказной работы по заданному критерию

При определении работоспособности деталей по критерию прочности, износостойкости, жесткости, теплостойкости, виброустойчивости, точности расчетные параметры сопоставляют с предельными величинами - характеристиками прочности (предел текучести, прочности, выносливости), предельной нагрузкой, ресурсом, предельными перемещениями (упругими, износами, температурными), теплостойкостью масла и материа-

лов, динамической устойчивостью или нормативным материалом, а также по опытным данным (по результатам наблюдений в эксплуатации).

Расчетное условие:  $Y \leq Y_{lim} / n$ ,

где  $Y$  - расчетный параметр критерия;  $Y_{lim}$  - предельное значение параметра;  $n$  - коэффициент безопасности.

Расчет ведут по наиболее неблагоприятным условиям. При вероятностных методах расчета  $Y$  и  $Y_{lim}$  рассматривают как случайные величины, и мерилем надежности является вероятность безотказной работы  $P$  по заданному критерию.

При 50% вероятности расчетное условие имеет вид

$$\bar{Y} - \bar{Y}_{lim} = 0,$$

а для обеспечения вероятности  $P$

$$\bar{Y} - \bar{Y}_{lim} = U_P \sigma,$$

где  $\bar{Y}$ ,  $\bar{Y}_{lim}$  - средние значения  $Y$  и  $Y_{lim}$ ;  $\sigma = \sqrt{\sigma_{lim}^2 - \sigma_Y^2}$  - среднее квадратичное отклонение разности случайных величин  $Y_{lim}$  и  $Y$ ;  $\sigma_{lim}$  и  $\sigma_Y$  - среднее квадратичное отклонение величин  $Y_{lim}$  и  $Y$ ;  $U_P$  - квантиль нормированного нормального распределения функции от  $P$ .

Вероятность  $P$  определяют по таблицам в зависимости от квантили

$$U_P = - \frac{\bar{Y}_{lim} - \bar{Y}}{\sigma}.$$

Интересна связь между квантилью  $U_P$  как характеристикой вероятностного расчета и коэффициентом безопасности  $n = \bar{Y}_{lim} / \bar{Y}$ . Для этой цели вводятся коэффициенты вариации

$$V_{lim} = \sigma_{lim} / \bar{Y}_{lim}; \quad V_Y = \sigma_Y / \bar{Y}.$$

С учетом этого

$$U_P = - \frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 V_{lim}^2 + V_Y^2}}.$$

Параметр  $Y$  может быть представлен как функция от случайных факторов  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , т.е.

$$Y = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Из разложения функции  $\varphi$  в ряд Тейлора при отбрасывании членов, начиная с третьего вследствие их малости, записывается среднее значение  $\bar{Y}$  и среднее квадратичное  $\sigma_Y$ :

$\bar{Y} = \Psi(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n); \sigma_Y = \sqrt{\sum (\frac{\partial \Psi}{\partial X_i})^2 \sigma_{X_i}^2}$ ,  
 где  $\frac{\partial \Psi}{\partial X_i}$  - частная производная функции  $\Psi$  по фактору  $X_i$ ;

$\sigma_{X_i}$  - среднее квадратичное значение факторов.

Значения числовых характеристик распределения случайных факторов  $\bar{X}_i$  и  $\sigma_{X_i}$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$ , упрощенно можно оценивать по предельным значениям фактора, т.е. по  $X_{i \min}$  и  $X_{i \max}$ . Тогда

$$\bar{X}_i = \frac{X_{i \max} + X_{i \min}}{2}; \quad \sigma_{X_i} = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{d}$$

где  $d$  - коэффициент, зависящий от числа опытов  $N$  (при изменении  $N$  от 2 до 100 величина  $d$  равна 1,13-5,0). Эти характеристики можно выбирать также по справочным данным или на основе специальных экспериментов.

При нормированных максимальных и минимальных значениях факторов (например, технологические допуски) полагают

$$\sigma_{X_i} = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{6}$$

Это соответствует вероятности  $P$  нахождения значения фактора в пределах допуска, равной 0,997.

При других значениях вероятности  $P$

$$\sigma_{X_i} = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{2 U_P}$$

Значения  $2 U_P$  зависят от  $P$ :

$P \dots$	0,9	0,95	0,999
$2 U_P \dots$	3,29	3,92	6,38

#### 4.2. Расчет по критерию прочности

При расчетах на сопротивление усталости нагруженность машины характеризуется спектрами нагрузок, которые могут быть дискретными или непрерывными.

Дискретные спектры представляются зависимостью нагрузки  $F$  от относительной продолжительности  $P$  ее действия или суммарной продолжительности  $\Sigma P_i$  от нагрузок в порядке их убывания (первая зависимость дифференциальная, вторая - интегральная).

При непрерывном спектре нагрузок задают функцию плотности распределения  $f(F)$  или интегральную функцию  $P(F) =$

$\int_0^F f(F) dF$ . Практически чаще используют графики, когда нагрузка откладывается по оси ординат, а по оси абсцисс — функция  $I-P(F)$ . Эта функция означает долю продолжительности действия нагрузки, которая больше данной величины.

В целях упрощения функции  $f(F)$  и  $I-P(F)$  заменяют ступенчатыми с интервалом  $\Delta F$ . Относительная продолжительность действия нагрузки  $F_i$  равна  $P_i = \int(F_i) \Delta F$ .

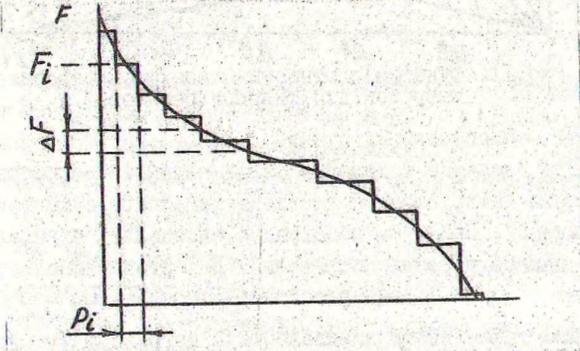


Рис.10. Интегральный спектр нагрузок

Спектры нагрузок разнообразны, однако их можно свести к нескольким типовым, которые представляются в виде спектра относительных нагрузок, обычно выраженных в долях от максимальной.

Функции плотности  $f(F/F_{max})$  и интегральные функции  $I-P(F/F_{max})$  спектров относительных нагрузок различны для тяжёлого, легкого, особо легкого режимов (функция  $\beta$ -распределения), для равновероятного режима (функция равновероятного распределения); среднего нормального (функция нормального распределения) (рис.11).

При переменных режимах спектры нагрузок удобно задавать начальными моментами  $M_k$   $k$ -того порядка, которые отражают свойства спектра и определяются по формулам:

для дискретных спектров 
$$M_k = \sum (F_i/F_{max})^k P_i;$$

для непрерывных спектров 
$$M_k = \int_0^{\infty} (F/F_{max})^k f(F/F_{max}) d(F/F_{max}).$$

Известно, что начальный момент 1-го порядка равен среднему значению нагрузок; первый и второй начальные

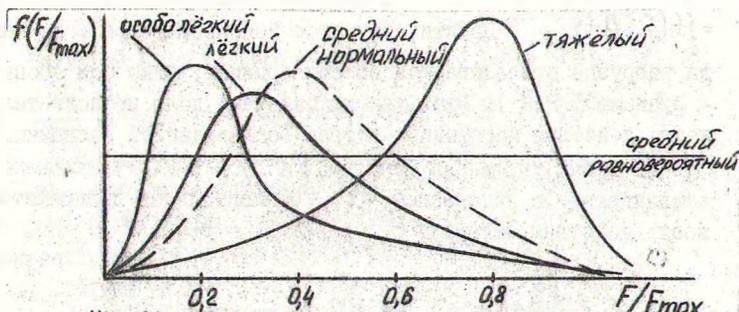


Рис. 11. Функции плотности спектров относительных нагрузок для типовых режимов

моменты — дисперсии нагрузки.

При расчетах деталей и узлов машин на сопротивление усталости базируются на гипотезе линейного суммирования повреждений. При этом необходимо определить эквивалентное число циклов перемен напряжений. Для этого используют коэффициент эквивалентности циклов  $K_{EN} = M_k$ . Необходимо также найти эквивалентную нагрузку. Для этого используют коэффициент эквивалентности режима нагружений Крех,  $K_{рех} = \sqrt[M]{M_k}$ , где  $k$  выбирается в зависимости от показателя степени  $m$  кривой усталости, т.е. зависимости напряжений от числа циклов их перемен. При напряжениях, пропорциональных нагрузке,  $k = m$ .

Значения начальных моментов  $M_k$  вполне определены для нагрузок типовых режимов нагружения. Например, для тяжелого — при  $k = 1$   $M_k = 0,772$ , при  $k = 6$   $M_k = 0,300$ .

Максимальная нагрузка  $F_{max}$  и соответствующий начальный момент  $M_k$  могут задаваться при расчетах на прочность.

Случайная природа нагрузок связана с целым комплексом факторов. Например, для транспортных машин:

- рассеяние режимов эксплуатации по нагрузке и скорости;
- рассеяние состояния дорог и подъездных путей;
- рассеяние частоты включения, торможения, квалификации водителя;
- рассеяние типов машин.

Влияет также внутренняя динамика машин (нагрузки от зубчатых передач, неуравновешенность деталей, перераспре-

деление нагрузок и т.д.).

Числовые значения (в среднем 0,1 ..., 0,15) коэффициентов вариации нагрузки  $V_F$  устанавливаются для отдельных отраслей машиностроения.

Нагрузка постоянного режима нагружений, эквивалентная по усталостному воздействию рассматриваемому переменному режиму, соответствует коэффициенту вариации эквивалентной нагрузки  $F$ :

$$F = F_{\max} K_{\text{реж}} \sqrt{N_{\Sigma} / N_G} \leq F_{\max},$$

где  $F_{\max}$  - максимальная нагрузка спектра;  $N_{\Sigma}$  - суммарное число циклов перемен напряжений за весь срок службы;  $N_G$  - число циклов до перелома кривой усталости.

Коэффициент эквивалентности режимов нагружения:

$$K_{\text{реж}} = \sqrt[m]{m_k}.$$

где  $k = m$ ,  $m$  - показатель степени кривой усталости, если напряжения пропорциональны нагрузке.

При расчетах по контактным напряжениям, пропорциональным корню квадратному из нагрузки,  $k = m/2$ .

Характеристику нагруженности отдельных деталей машин определяют пересчетом, а в наиболее ответственных случаях непосредственно измерением действующих напряжений. В этом случае осциллограмму подвергают статистической обработке с целью схематизации процесса. Имеется в виду, что реальный процесс заменяется эквивалентным переменным режимом с синусоидальной формой цикла нагружения. При этом используют методы максимумов, экстремумов, размахов, полных циклов.

Схематизированный процесс нагружения представляют спектром относительных напряжений  $\sigma_{\text{отн}} = \sigma_a / \sigma_{\max}$ , где  $\sigma_a$  - расчетные напряжения;  $\sigma_{\max}$  - максимальные напряжения спектра.

#### 4.3. Вероятность безотказной работы по критерию прочности

При расчетах по критерию прочности выбирают расчетное напряжение или нагрузку. Предельными величинами  $\sigma_{\text{лим}}$  являются пределы прочности, текучести, выносливости или несущая способность. В расчетах прочность определяют по соотношению расчетного напряжения  $\sigma_a$  и предельного по кри-

терию прочности  $\sigma_g$ . Превышение напряжения свыше него вызывает отказ. Значения  $\bar{\sigma}_a$  и  $\bar{\sigma}_g$  задают средними их значениями, среднеквадратичными значениями  $S_{\bar{\sigma}_a}$  и  $S_{\bar{\sigma}_g}$  и коэффициентами вариации  $V_a$  и  $V_g$ .

Вероятность безотказной работы или вероятность неразрушения  $P$  определяют по таблицам нормального распределения в зависимости от квантили:

$$U_P = - \frac{\bar{\sigma}_g - \bar{\sigma}_a}{\sqrt{S_{\bar{\sigma}_g}^2 + S_{\bar{\sigma}_a}^2}} = - \frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 V_g^2 + V_a^2}}$$

где  $\bar{n} = \bar{\sigma}_g / \bar{\sigma}_a$  - коэффициент запаса прочности по средним напряжениям.

Влияние концентратора напряжений учитывается при расчете местных напряжений умножением номинального напряжения на теоретический коэффициент концентрации, а также при определении предела выносливости.

При обычных расчетах переменность режима нагружений и срок службы учитывают при выборе допускаемого напряжения или при выборе эквивалентной нагрузки. В первом случае требуется предварительное определение эквивалентного числа циклов перемен напряжений. Учет производится умножением допускаемого напряжения на коэффициент долговечности  $K_L$  или делением максимальной нагрузки на этот коэффициент.

При линейной гипотезе суммирования усталостных напряжений

$$K_L = \sqrt[m]{N_G / N_E} \geq 1,$$

где  $N_E = K_{EM} N_\Sigma$  - эквивалентное число циклов перемен напряжений;  $K_{EM} = \mu_R$  - коэффициент эквивалентности циклов, равный начальному моменту  $R$ -го порядка спектра нагрузок;  $N_\Sigma$  - число циклов до перелома кривых усталости;  $N_G$  - суммарное число циклов за весь срок службы.

Коэффициент износа по средним:

$$\bar{n} = \frac{\bar{\sigma}_R - K_L}{\bar{\sigma}_{max}}$$

где  $\bar{\sigma}_R$  - среднее значение предела выносливости;  $\bar{\sigma}_{max}$  - среднее значение максимального напряжения;  $K_L$  - среднее значение коэффициента долговечности.

Пределные напряжения определяют по эмпирическим за-

зависимостям.

#### 4.4. Теория подобия усталостного разрушения Серенсена-Когаева

Основной критерий - отношение  $\frac{L}{\bar{\sigma}}$ , где  $L$  - периметр опасного сечения или его наиболее напряженной части;  $\bar{\sigma} = \frac{I}{\sigma_{max}} \frac{d\sigma_1}{dx}$  ( $\sigma_{1max}$  - первое главное напряжение в наиболее напряженной точке периметра опасного сечения) - относительный градиент.  $\frac{L}{\bar{\sigma}}$  пропорционален напряженному объему, в котором возможно зарождение трещины.

Для деталей круглого, прямоугольного сечений и т.д. при изгибе и других видах нагружения при наличии галтелей, выточек и т.п. имеются вполне определенные соотношения для  $L$  и  $\bar{\sigma}$ .

Из уравнения подобия этой теории получены выражения  $\bar{\sigma}_g$  и  $U_g$ , которые достаточно точно описывают закономерности усталостного повреждения деталей разной геометрической формы:

$$\bar{\sigma}_g = \varepsilon_{\infty} \bar{\sigma}_1 (1 + \ell) \quad \text{- медианное значение предела выносливости;}$$

$$U_g = \frac{(1 - 10^{2S}) \ell}{2(1 + \ell)} \quad \text{- коэффициент вариации предела выносливости;}$$

$$\text{где } \ell = \frac{1 - \varepsilon_{\infty}}{\varepsilon_{\infty}} \left( \frac{1}{88,3} \frac{L}{\bar{\sigma}} \right)^{\sqrt{6}}$$

Здесь входят четыре параметра:  $\bar{\sigma}_1$  - медианное значение предела выносливости гладкого образца диаметром 7,5 мм при изгибе с вращением;  $\sqrt{6}$  - эмпирический коэффициент;  $\varepsilon_{\infty}$  - коэффициент влияния абсолютных размеров, найденных для гладкой детали максимально большого диаметра при изгибе с вращением;  $S$  - среднее квадратичное отклонение логарифма величины  $(\bar{\sigma}_g - U)$ , где  $U$  - минимальная граница  $\bar{\sigma}_g$ . Коэффициент 88,3 равен значению  $L / \bar{\sigma}$  для гладкого образца диаметром 7,5 мм.

При ориентировочных расчетах принимают  $\sqrt{6} \approx 0,01$ . Значения  $\varepsilon_{\infty} = 0,5$  - для конструкционных сталей, деформируемых легких сплавов и модифицированных чугунов. Величина  $S = 0,045-0,05$  - для конструкционных сталей;  $S = 0,05-0,06$  - для алюминиевых и магниевых деформируемых сплавов.

Эта теория нашла применение для оценки усталостной прочности деталей самолетов, железнодорожного подвижного состава и др., но при этом не учитываются технологические факторы.

Существует метод двухпараметрического подбора усталостного разрушения. При этом методе используются только два экспериментальных параметра: медианное значение и коэффициент вариации предела выносливости образца, в связи с чем сокращается объем испытаний. Этот метод позволяет оценить надежность детали с несколькими концентраторами напряжений, разнесенными по длине.

#### 4.5. Вероятность безотказной работы машин

Таким образом сущность расчета на надежность сводится к определению одной или нескольких количественных характеристик надежности машин. Например, определяется вероятность безотказной работы, коэффициент технической готовности, коэффициент технического использования и др. На основании полученных показателей указывают пути повышения надежности.

При совместных износах (вероятность  $P_u(t)$ ) и внешних отказах (вероятность  $P_g(t)$ ) отказы общая вероятность подсчитывается по теореме умножения вероятностей

$$P(t) = P_u(t) P_g(t)$$

и, если известны параметры законов распределения, то по этой формуле рассчитывается общая вероятность изделия.

Левозаготовительное оборудование представляет собой сложную систему, состоящую из элементов, находящихся во взаимодействии.

Существуют два основных вида соединения элементов: последовательное и параллельное.

Последовательное - такое, при котором отказ одного элемента влечет за собой отказ всей системы.

Параллельное - когда отказ всей системы возможен только при условии отказа каждой из параллельных ветвей.

Вероятность безотказной работы системы с последовательным (рис.12) соединением равна произведению вероятностей безотказной работы элементов:

$$P_{\text{пос}}(t) = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i$$

Если вероятность безотказной работы одинакова для всех элементов,

$$P_{\text{плос}}(t) = P_i^n.$$

Если  $P_i = 0,99$ , то  $P_{\text{плос}}(t) = (0,99)^{50} = 0,6$ .

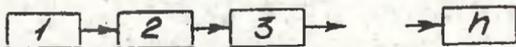


Рис.12. Схема последовательного соединения элементов сложной системы

Вероятность безотказной работы  $P_{\text{пар}}$  при параллельном соединении элементов (рис.13), когда резервные элементы постоянно присоединены к основным, подсчитывается так.

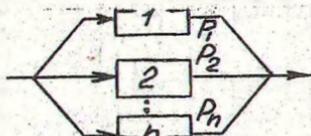


Рис.13. Схема параллельного соединения элементов сложной системы.

Вероятность появления всех отказов  $q(t)$ , когда будет отказ всей системы, равна

$$q(t) = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n = \prod_{i=1}^n q_i,$$

где  $q_1, q_2, \dots, q_n$  - вероятности появления отказа каждого  $i$ -того элемента за время  $t$ .

Тогда вероятность безотказной работы системы

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i).$$

Если вероятность отказа каждого из 3-х элементов ( $n = 3$ ) равна  $0,1$  ( $q = 0,1$ ), то  $P_{\text{пар}}(t) = 1 - (0,1)^3 = 0,999$ .

В случае ненагруженного резервирования (с замещением резерва) (рис.14) отключенные (резервные) элементы включаются только тогда, когда основное изделие отказывает. При известных количественных характеристиках надежности в составе парка машин можно рассчитать потребность в тех или иных узлах, которые необходимы для соблюдения нормативов на резервирование.

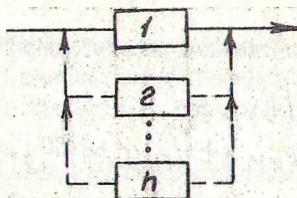


Рис.14. Схема параллельного соединения элементов с замещением резерва

При раздельном резервировании надежность системы повышается, так как выключается резервный элемент при отказе любого элемента (рис.15).

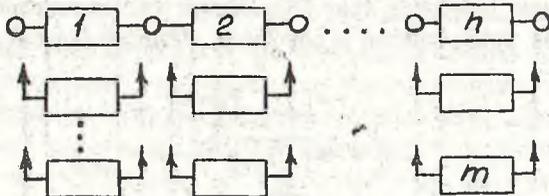


Рис.15. Схема соединения элементов сложной системы с раздельным резервированием

При одинаковых элементах, когда  $P_i = P_1$ ,

$$P_p(t) = [1 - (1 - P_1)^m]^n.$$

При общем резервировании, т.е. когда при выходе из строя любого элемента выключаются резервные элементы цепи, полностью заменяющие данную цепь, вероятность безотказной работы

$$P_o(t) = 1 - \prod_j^m (1 - P_j) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \prod_{i=1}^n P_i),$$

где  $P_i$  и  $P_j$  - вероятности безотказной работы одного элемента и соответственно всей цепи;  $m$  - количество всех цепей.

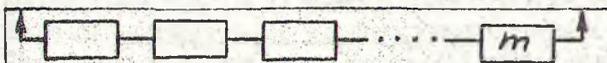


Рис.16. Схема соединения элементов сложной системы с общим резервированием

#### 4.6. Предельные состояния деталей, сопряжений и узлов машин по износу

Критерии износа устанавливаются по степени их влияния на работу машины. Рассматривают три случая:

1. В результате износа машина не может больше функционировать;
2. Период аварийного износа;
3. Характеристика оборудования выходит за допустимые или рекомендуемые пределы.

При определении наработок  $T$  детали используют кривую износа в зависимости от наработки и величину предельного износа  $U_{\text{пред}}$

$$T = U_{\text{пред}} / \gamma$$

где  $\gamma$  - функция, характеризующая скорость изнашивания детали,

$$\gamma = \frac{dU}{dt}$$

$U_{\text{доп}} < U_{\text{пред}}$ , т.к. деталь не должна выйти из строя в течение последующей межремонтной наработки  $T_I$ , за которую износ составит  $\gamma \cdot T_I$ . Тогда  $U_{\text{доп}} + \gamma \cdot T_I = U_{\text{пред}}$ . Так как  $\gamma = U_{\text{доп}} / T_p$  ( $T_p$  - наработка до ремонта), то, следовательно,

$$U_{\text{доп}} + \frac{U_{\text{доп}}}{T_p} T_I = U_{\text{пред}}$$

Откуда

$$U_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{пред}}}{1 + (T_I/T_p)}$$

Можно записать зависимость  $T_p = K T_I$ , где  $K$  - коэффициент, учитывающий изменение наработки, если до последнего ремонта в данный периодический ремонт производится дефектация деталей. В этом случае  $U_{\text{доп}}$  будет:

$$U_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{пред}}}{1 + (T_I/K T_I)} = \frac{K}{1 + K} \cdot U_{\text{пред}}$$

Зная  $U_{\text{пред}}$  можно определить наработку  $T_p$  деталей, заменяемых при периодических ремонтах, для чего сделаем подстановку в формулу  $U_{\text{доп}} = \gamma T_p$ . Тогда получим, что

$$T_p = \frac{K}{(1 + K)} \cdot \frac{U_{\text{пред}}}{\gamma}$$

#### 4.7. Оптимальная долговечность

Под оптимальной долговечностью техники понимают наиболее экономически эффективный срок ее использования до замены с учетом оптимального обслуживания ее ремонтом.

Определение оптимальной долговечности - экономическая задача, связанная с техническими вопросами.

Оптимальный срок службы - срок, при котором будут минимальные затраты и потери на единицу продукции или выполненной работы.

Удельные затраты и потери, связанные с использованием машины, отнесенные на единицу выполненной работы:

$$C_{уд} = \frac{C_{об}}{t} = \frac{C_m}{t} + c + ct^{\delta-1},$$

где  $C_{об}$  - общие (суммарные) затраты и потери потребителей, связанные с использованием машины;  $t$  - время работы машины;  $C_m$  - затраты на приобретение машины (с учетом реализации последующих ее остатков);  $c$  - затраты и потери на хранение, топливо и рабочую силу;  $c$  - постоянный для данного объекта коэффициент, определяющий исходную норму прогрессирующих затрат и потерь потребителя;  $\delta$  - показатель степени роста затрат и потерь по мере старения объекта.

При расчете оптимального срока службы машины определяется минимум функции уравнения. Эта функция называется функцией удельных затрат и потерь.

Выражение для определения оптимального срока службы машины получим, приравняв нулю производную этой функции и решая результат относительно  $t$ :

$$t = T_{опт} = \sqrt[\delta]{\frac{C_m}{(\delta - 1)c}}$$

Видно, что  $T_{опт}$  зависит от  $C_m$ , постоянного коэффициента  $c$ , который учитывает затраты на поддержание машины в работоспособном состоянии, и показателя  $\delta$ .

Оптимальная долговечность парка машин определяется по

формуле

$$T_{опт}^{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i T_{опт}^i}{\sum_{i=1}^n N_i}$$

где  $K$  - число групп машин;  $N_i$  - число машин, эксплуатируемых в каждой  $i$ -той группе;  $T_{opt}$  - оптимальная долговечность каждой из  $i$ -тых групп. Т.е. видно, что оптимальная долговечность парка машин является средним из оптимальных долговечностей групп машин.

## 5. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

### 5.1. Классификация методов испытаний

Испытания оборудования на надежность производятся для оценки фактического уровня его надежности. Т.е. в результате получают данные о степени пригодности машины или оборудования выполнять заданные функции, а также данные для планирования возможностей их использования в эксплуатации.

Если эти данные накапливаются постоянно, то можно судить об эффективности проводимых конструкторских, технологических и эксплуатационных мероприятий.

Испытания на надежность требуют больших затрат времени ввиду того, что сроки службы машин длительные, происходит также рассеивание данных ввиду различия условий эксплуатации и др., например, различие технических требований, предъявляемых к машинам.

Объектами при испытаниях на надежность являются:

- 1) образцы (для испытаний на износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и др.);
- 2) сопряжения и кинематические пары (подшипники, зубчатые колеса, муфты сцепления и др.);
- 3) узлы машин (при испытаниях на работоспособность коробки передач, задних мостов и т.д.);
- 4) машины в целом (стендовые и эксплуатационные);
- 5) системы машин (для определения показателей надежности во взаимодействии отдельных машин).

Классифицируются методы испытаний в соответствии с приведенной ниже схемой (рис.17).

При испытаниях получают данные в первую очередь о распределении отказов в наработке.

По типу распределений отказов производятся: испытания



Рис. 17. Классификация методов испытаний

на внезапные (аварийные) отказы; испытания на износные (постепенные) отказы; комплексные испытания — учитываются все виды отказов (при создании и доводке новых моделей машин).

При внезапных отказах испытанию подвергают одновременно  $n$  изделий без замены вышедших из строя, когда их число постепенно уменьшается. При этом определяют наработку каждого изделия или долю отказавших изделий. Могут производиться испытания также по варианту, когда производится замена изделий, вышедших из строя.

Среднее время отказов  $M\tau$  при испытаниях до  $z$  отказов (они произошли за время  $t_z$ , число отказавших изделий  $z$ ) равно

$$M\tau = \frac{\sum_{i=1}^z t_i + (n-z)t_z}{z},$$

где  $n$  — число изделий в работе;  $\sum_{i=1}^z t_i + (n-z)t_z$  — сумма наработки всех деталей за период  $t_z$ , как отказавших, так и не отказавших;  $t_1, t_2, \dots, t_z$  — время безотказной работы каждого из  $z$  отказавших изделий.

При оценке параметров износных отказов, когда испыта-

ния ведутся до отказа всех  $n$  изделий (элементов) при нормальном законе их распределения математическое ожидание  $M_T$  и среднее квадратичное отклонение  $\sigma_T$  времени работы без износных отказов равны

$$M_T = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n};$$
$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_T - t_i)^2}{n-1}}$$

где  $t_i$  - время работы без износных отказов  $i$ -того изделия

Оценка скорости изменения основных параметров машин с течением времени. Одним из основных видов испытаний машин на надежность является оценка скорости изменения ее основных параметров с течением времени. Основные оцениваемые при этом параметры: точность выполнения служебных функций, производительность, КПД, мощность, скорость движения, расход топлива, качество работы и т.д.

Испытания машин на соответствие техническим требованиям дают определенную информацию и о надежности, хотя главная их цель другая - получение данных по недолговечным элементам, близость параметров к предельным их значениям и др.

Главная цель испытаний новых машин состоит в определении фактического уровня надежности. При проведении контрольных (в основном после ремонта) испытаний ставится цель убедиться, что фактический уровень надежности не ниже предельного.

## 5.2. Планирование объема испытаний

При испытаниях определяют время работы и число испытываемых объектов, необходимых для обеспечения соответствующей достоверности данных. При оценке машины в целом план испытаний строят так, чтобы с заданной точностью определить ее коэффициент готовности. Нарботка на отказ с заданной степенью точности определяется, если оценивается только безотказность машины.

Принято, что полные испытания неремонтируемого изделия закончены, когда вероятность его безотказной работы

$P(t_u) = 0,1$ . Для нормального закона, например,

$$P(t_u) = F_0 \left( \frac{T - t_u}{\sigma} \right) = 0,1,$$

где  $T$  - среднее время безотказной работы;  $t_u$  - время испытаний.

Откуда  $t_u = T - u_{0,1} \sigma = T + u_{0,9} \sigma = T + 1,28 \sigma = T(1 + 1,28 \nu_t)$ ,

где  $u_{0,1} = \frac{T - t_u}{\sigma}$  - квантиль при вероятности 0,1;

$\nu_t$  - коэффициент вариации времени безотказной работы.

Число объектов испытаний для неремонтируемых изделий равно

$$N_{T_{cp}} = \frac{t_b^2 \nu_t^2}{\Delta_T^2},$$

где  $t_b$  - время восстановления;  $\nu_T = \sigma_T / T_{cp}$ ;  $\Delta_T$  - степень точности наработки на отказ.

Для ремонтируемых изделий

$$N_p = \frac{t_b^2 (1 - P)}{\Delta_p^2 \cdot P},$$

где  $P$  - вероятность безотказной работы;  $\Delta_p$  - степень точности вероятности безотказной работы.

Число отказов

$$n_{отф} = \frac{t_b^2 \nu_t^2}{\Delta_{T_{cp}}^2};$$

$$n_{отф} = \frac{t_b^2 (\nu_b^2 + \nu_t^2)}{\xi_z^2}.$$

где  $\nu_b$  - коэффициент вариации времени восстановления;

$\xi_z$  - относительная погрешность.

### 5.3. Ускоренные испытания на надежность

Учитывая длительное время испытаний на надежность, значение ускоренных испытаний велико. Производятся они различными методами.

Коэффициент ускорения испытаний

$$K_u = \frac{T_H}{T_0},$$

где  $T_H$ ,  $T_\Sigma$  - время безотказной работы при нормальных условиях и фактическое время.

Применяют следующие методы ускоренных испытаний.

1. Усиление режима работы. Производится за счет увеличения скоростей, нагрузок, температур, применения агрессивных сред и т.п. Следует иметь в виду, что предельные значения факторов должны быть такими, чтобы не искажалась физическая сущность явлений разрушений.

Для определения коэффициента ускорения  $K_y$  необходимо знать функциональную зависимость процесса разрушения от влияющего фактора.

При линейной зависимости, например, износа от нагрузки  $P$  и скорости износа  $V$

$$K_y = \frac{P_{max} V_{max}}{P_{cp} V_{cp}}$$

где  $P_{max}$  и  $P_{cp}$  - максимальное и среднее значения нагрузок;  $V_{max}$  и  $V_{cp}$  - максимальное и среднее значения скоростей износа.

2. Сокращение простоев и холостых ходов. При данном методе необходимо, чтобы длительность простоев и холостых ходов была минимально допустимой. При отсутствии холостых ходов  $T_x$  и непрерывной работе  $T_p$

$$K_y = \frac{T_p + T_x}{T_p}$$

3. Повышение точности измерения параметра. Если повысить точность измерения (например, износа), то по характеру процесса можно установить за короткий срок ход процесса полностью. Предельная погрешность метода измерения

$$\Delta \ln = 0,4 d_n \frac{\bar{n} \bar{v}_y}{m} \sqrt{q}$$

где  $d_n$  - коэффициент размаха, зависящий от объема выборки;  $\bar{v}_y$  - среднее значение величины износа;  $\bar{u}$  - коэффициент вариации;  $m$  - число интервалов разделения размаха выборки;  $q$  - число повторных измерений.

4. Длительные условные полевые допуски. Условный от-каз фиксируется при выходе обрабатываемого размера за пре-

цели допуска.

$$K_y = \frac{\delta}{\delta_y}$$

где  $\delta$  — величина допуска;  $\delta_y$  — условный допуск.

5. Использование сопряженных распределений. Если известна связь показателей надежности с теми параметрами машины, которые ее определяют, то можно сократить время испытаний.

Так, в случае, если два распределения будут сопряженными, (т.е. одно определяет другое), то вместо функции распределения времени безотказной работы  $P_T(t)$  можно исследовать кривую распределения выходных параметров машины  $P_X(t)$  и ее изменение во времени. При этом можно получить две эквивалентные формулы для вероятности безотказной работы  $P(t)$ , в одну из которых входят математическое ожидание и среднее квадратичное значение времени безотказной работы, а в другую — статистические показатели выходных параметров машины. Последние оцениваются при испытаниях гораздо быстрее. При этом удается прогнозировать надежность при достаточно непродолжительных испытаниях.

6. Использование закономерностей отказов. Время испытаний может быть сокращено до минимума, если теоретически или экспериментально найдена физическая сущность отказов. При этом установлены закономерности, связывающие интенсивность процессов с физическими параметрами.

Например, установлено, что скорость абразивного изнашивания линейно зависит от твердости материала, удельного давления, скорости скольжения и т.п. Установлены также средние значения и дисперсия этих величин. В этом случае быстро можно найти скорость изнашивания, а зная ее, легко определяем и безотказность.

#### 5.4. Сущность технической диагностики машины

Перед выполнением технических обслуживаний необходим индивидуальный контроль состояния отдельных агрегатов, узлов и машины в целом, который осуществляется без разборки. Это позволяет заблаговременно выявить скрытые неисправности и определить перечень профилактических и ремонтных работ.

Диагностика ставит своей целью определение, регистрацию и анализ информации, которая позволяет оценить техническое состояние машины или ее отдельного элемента без разборки.

С точки зрения надежности, диагностика - научное предсказание времени возникновения отказов. Т.е. предсказывается (определяется) состояние машины, в которое она перейдет после определенного времени работы.

В надежности рассматривается 3 метода прогнозирования отказов: статистический, индивидуальных измерений, граничных испытаний.

В последнем случае прогнозирующие параметры машины определяются при работе в особо сложных (утяжеленных) режимах. При этом определяются слабые элементы и скрытые дефекты, которые в процессе эксплуатации могут привести к внезапным отказам.

## 6. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЛЕСНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

### 6.1. Общие направления повышения надежности

Вообще принципиально существуют следующие направления по обеспечению высокой надежности машин и оборудования: обеспечение высокого технического уровня изделий; применение агрегатов и деталей с высокой надежностью и долговечностью (по своей природе - применение чистого жидкостного трения, электрического торможения и т.д.); применение деталей и узлов, самоподдерживающих работоспособность (самосмазывание, самоустанавливание и т.д.); применение жестко регламентируемой технологии.

### 6.2. Специфика состояния вопросов надежности лесопромышленного оборудования

В тракторном, автомобильном и лесном машиностроении осуществлен целый комплекс конструкторско-технологических мероприятий по повышению безотказности и долговечности изделий. Несмотря на это, надежность технологического оборудования, базовых тракторов и автопоездов еще недостаточна, недостаточно решаются вопросы ремонтпригодности и сохраняемости. Например, межремонтные сроки службы тракторов

после ремонта составляют всего 40-60% новых.

Повреждения и отказы автомобилей можно объединить в следующие группы:

1. Повреждения усталостного характера;
2. Износ валов, втулок и т.д;
3. Повреждения резинотехнических изделий;
4. Неисправности вследствие нарушения регулировок;
5. Перетирание;
6. Прогорание прокладок, газопроводов;
7. Течь масла;
8. Прочие неисправности.

В процентном отношении повреждения и неисправности по группам составляют, например, для автомобиля ЗИЛ-131:

1 - 44%; 2 - 9%; 3 - 22%; 4 - 1%; 5 - 2%; 6 - 1%;  
7 - 1%; 8 - 20%.

Количество повреждений и неисправностей для автомобилей других марок, а также тракторов может несколько изменяться в зависимости от их типа, характера использования, условий эксплуатации.

Детали базовых автомобилей и тракторов можно подразделить по ресурсу. Например, для автомобилей их делят на: детали, ресурс которых невозможно или экономически нецелесообразно создавать равным пробегу до капитального ремонта (фрикционные накладки, фильтры, сальники и т.д.); детали, внезапный выход из строя которых не влияет на безопасность движения (шестерни, валы коробки передач, подшипники), их ресурс определяет значение ресурса до капремонта; детали шасси, которые не угрожают безопасности движения, по их ресурсу производится списание; детали, выход из строя которых угрожает безопасности движения (рулевое управление, тормоза и т.д.), их ресурс превышает ресурс до полного списания.

Особую важность представляет собой обеспечение надежности деталей, выход из строя которых угрожает безопасности движения.

Так, тормозная система - одна из наименее надежных систем автомобиля. Например, для тормозных пневматических систем автомобилей большой грузоподъемности детали, лимити-

тирующие надежность тормозов, имеют большое рассеивание ресурса (30-250 тыс. км), коэффициент вариации изменяется в пределах 0,34-1,0. На долю неметаллических деталей приходится наименьший ресурс (например, резиновая диафрагма). Для этих деталей высший коэффициент вариации (0,9-1,0), а в этом случае эффективность диагностики мала. Здесь эффективным будет резервирование.

Примером резервирования может служить установка на автомобиле параллельно одна другой 3-х тормозных систем: ножная, дополнительная, ручная.

При анализе надежности II машин ТБ-I в условиях северной зоны после наработки 1000 мото-часов было зафиксировано 1012 отказов, т.е. в среднем по 94,7 отказа на трактор.

Преобладающее число отказов приходится на гидросистему - 39,2% и на технологическое оборудование - 27,2%.

Установлено, что одной из причин, вызывающих отказы, является недостаточная прочность деталей (68,3%). Более половины отказов по технологическому оборудованию и гидросистеме произошли из-за поломок и трещин. На гидроманипулятор приходится 47,3% отказов от всех отказов по технологическому оборудованию. Имели место трещины в стреле, по сварочным швам рукояти, в опорной башке, трещины трубопроводов высокого давления, трещины блоков насосов, повреждение штоков гидроцилиндров, уплотнительных колец и др.

Анализ неисправностей гидравлической системы показал, что нарушение ее работы происходит из-за нарушения герметичности соединений (искривление штоков гидроцилиндров, износ уплотнений), усталостных явлений, применения некачественного материала.

Лесозаготовительное оборудование подвержено действию значительных динамических нагрузок; одновременной механической вибрации, пульсации давления жидкости в системе, гидравлических ударов, возникающих в моменты включения и отключения гидроагрегатов, колебаниями давления в процессе рабочих операций с деревьями. Кроме того, ряд нагрузок усиливается повышением температуры, влиянием монтажных напряжений.

Для примера в табл.2 приведены данные по изменению давления в гидроцилиндре захвата трактора при укладке дерева в коник (разжатие захватов).

Таблица 2

Диаметр дерева, см	Вылет ма- нипулято- ра, м	Бесштоковая полость		Штоковая полость	
		$P_{max}$ МПа	$P_{min}$ МПа	$P_{max}$ МПа	$P_{min}$ МПа
16	7,3	3,0	1,5	6,4	2,1
18	6,2	2,8	1,8	5,0	1,4
24	6,7	3,1	2,5	4,3	2,3
24	5,7	3,4	1,7	5,5	2,6
34	5,0	3,5	1,8	5,8	2,4
36	6,4	5,4	3,6	-	-

В процессе оперирования с деревьями изменение нагрузок и давления жидкости в гидросистеме носит знакопеременный характер с частотой до 50 Гц. Имеют место также гидроудары с "выбросами" давления до 19 МПа. Знакопеременные динамические нагрузки в гидросистеме являются одним из главных факторов, вызывающих усталостные разрушения и образование трещин в технологическом оборудовании.

Рабочий процесс набора веза деревьев на трактор проходит в условиях переменных нагрузок, требует внимания оператора и частых воздействий на органы управления с целью достижения максимальной производительности, перехода от одной операции цикла к другой. Из-за нарушений технологии разработки лесосеки возможно использование машины для растаскивания завалов, что связано с большими динамическими перегрузками.

### 6.3. Обеспечение надежности

Обеспечение надежности производится комплексом конструктивных технологических, эксплуатационных, ремонтных мероприятий.

Повышение надежности деталей и узлов, отказывающих из-за усталостных повреждений или износа, производится с учетом повышения их несущей способности и износостойкости

(применение соответствующих материалов и оптимальных технологий обработки, применение покрытий, биметаллических подшипников и т.д.).

Такие мероприятия в равной мере свойственны для автомобилей, тракторов, лесотехнологического оборудования различного типа и назначения.

К числу конструктивных мероприятий по обеспечению повышенной надежности относятся:

1. Выбор долговечных материалов деталей и рациональных их сочетаний в парах трения;
2. Обеспечение нормальных условий работы деталей при наименьших потерях на трение;
3. Создание оптимальных температурных режимов работы, сопряжений деталей, узлов и агрегатов;
4. Обеспечение хороших условий смазки трущихся поверхностей деталей;
5. Создание эффективных устройств для очистки воздуха, топлива, смазки;
6. Улучшение конструкции и материалов уплотнительных устройств и герметизация узлов и агрегатов;
7. Обеспечение достаточной жесткости базовых деталей машин и устойчивости их к вибрации;
8. Другие мероприятия (применение узлов демпфирования двойных силовых пружин муфт сцепления, гидравлическое натяжение гусениц и т.д.).

К числу технологических мероприятий следует отнести:

1. Обеспечение необходимой точности и качества изготовления деталей;
2. Достижение высоких геометрических характеристик качества поверхностей;
3. Применение упрочнения деталей и их рабочих поверхностей термической и химико-термической обработками;
4. Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием;
5. Нанесение на поверхности деталей износостойких и антикоррозийных покрытий;
6. Другие мероприятия (термомеханическое упрочнение, армирование деталей, окраска и др.).

**Эксплуатационные мероприятия:**

1. Обкатка новых машин;
2. Организация техобслуживания и создание для этого необходимой базы;
3. Проведение периодических технических осмотров и диагностирования состояния машин;
4. Обеспечение нормального режима работы машин;
5. Соблюдение правил хранения машин в нерабочее время;
6. Соблюдение рекомендаций заводов-изготовителей по применению топлив, масел и смазок;
7. Контроль и постоянное соблюдение герметизации агрегатов, узлов и систем машин;
8. Другие мероприятия (повышение квалификации кадров, улучшение организации работ и др.).

**Ремонтные мероприятия:**

1. Обеспечение сохранности ремонтного фонда, поступающего на ремонтные предприятия;
2. Выполнение разборочных работ при условиях, исключаящих повреждение деталей и разукomплектовку пар;
3. Эффективная мойка и очистка деталей;
4. Контроль и дефектация изношенных деталей машин;
5. Сплошной контроль размеров и геометрии рабочих поверхностей базовых деталей машин, поступающих в ремонт, а также точности их взаимного расположения;
6. Весовой и размерный подбор деталей цилиндро-поршневой группы (для двигателя внутреннего сгорания);
7. Динамическая балансировка вращающихся деталей;
8. Обеспечение регламентированных посадок, усилий затяжки и сборки резьбовых соединений;
9. Обеспечение герметизации узлов и агрегатов при ремонте;
10. Стендовая обкатка и испытания;
11. Качественная окраска ремонтируемых машин и оборудования.

Для повышения долговечности восстанавливаемых деталей машин используют различные методы. Широкое распространение получило восстановление наплавкой: наплавка в среде газа;

наплавка в газовой среде на основе аргона; наплавка порошковыми проволоками; наплавка под легированными керамическими флюсами; плазменная наплавка; индукционная наплавка.

В практике предприятий применяется восстановление сваркой, а также наплавкой и сваркой.

Повышение долговечности и прочности в этом случае обеспечивается приемами: поверхностная закалка с нагревом Т.В.Ч., газовым пламенем или плазменной дугой; поверхностным пластическим деформированием; электромеханической обработкой; химико-термической обработкой; термомеханической обработкой, проводимой в процессе наплавки.

Дает хорошие результаты восстановление и упрочнение деталей гальваническими покрытиями; восстановление полимерными материалами. Применяют также электроконтактную наплавку, электроимпульсное наращивание, электроискровое наращивание, армирование твердыми сплавами, заливку жидким металлом.

## 7. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

### 7.1. Экономическая эффективность повышения надежности машин при их производстве и эксплуатации

Критерий экономической оценки оборудования по уровню долговечности деталей – сумма приведенных затрат, учитывающая текущие и капитальные затраты на производство и использование машин.

Мероприятия по повышению долговечности делят условно на две группы.

Мероприятия I группы не оказывают существенного влияния на производительность машины и другие ее параметры.

Экономическая эффективность в данном случае

$$\Delta_{г.р.} = V_{г.1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Ц_{i0} + З_{i0}}{t_{i0}} - \frac{Ц_{i1} + З_{i1}}{t_{i1}} \right),$$

где  $\Delta_{г.р.}$  – годовой экономический эффект от повышения долговечности деталей, руб.;  $V_{г.1}$  – годовой выпуск новых машин, шт.;  $Ц_{i0}$ ,  $Ц_{i1}$  – цены составляемых деталей, руб.;  $З_{i0}$ ,  $З_{i1}$  – зарплата рабочих по установке и периодической замене сменяемых деталей, руб.;  $t_{i0}$ ,  $t_{i1}$  – срок службы

сопоставляемых деталей (кратные срокам службы машин), годы;  
 $n$  - количество деталей, заменяемых на упрочненные.

Мероприятия 2-й группы вызывает повышение производительности машин. Учитывается уменьшение числа простоев, т.е. увеличивается коэффициент использования рабочего времени, вырастает наработка машин.

Экономическая эффективность

$$\mathcal{E}_{г.э.} = B_{г1} W_{г1} (J_0 - J_1),$$

где  $B_{г1}$  - годовой выпуск машин, укомплектованных более долговечными деталями; шт.;  $W_{г1}$  - годовая наработка более производительной машины, м<sup>3</sup>, т;  $J_0, J_1$  - приведенные затраты сопоставляемых новой и старой машин в расчете на единицу производительности, руб.;

$$J_0 = I_0 + E_H K_{ц0}; \quad J_1 = I_1 + E K_{ц1},$$

где  $I_0, I_1$  - эксплуатационные издержки в расчете на единицу производительности, руб.;  $E_H$  - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;  $K_{ц0}, K_{ц1}$  - капитальные вложения на единицу производительности старой и новой машин, руб.

## 7.2. Экономическая эффективность повышения надежности при восстановлении деталей

При повышении износостойкости

$$\mathcal{E}_{г.э.} = N_1 C_1 - N_2 C_2,$$

где  $\mathcal{E}_{г.э.}$  - годовой эффект от внедрения новой технологии восстановления деталей;  $N_1, N_2$  - количество деталей, которое необходимо восстановить при старой и соответственно при новой технологии;  $C_1, C_2$  - себестоимость восстановления деталей при старой и соответственно при новой технологии.

$$N_2 = N_1 \frac{T_1}{T_2} = N_1 \eta_u,$$

где  $T_1, T_2$  - технический ресурс детали, восстановленной по старой и соответственно по новой технологии;  $\eta_u$  - коэффициент относительной износостойкости.

Тогда

$$\mathcal{E}_{г.э.} = N_1 (C_1 - \eta_u C_2).$$

Экономия от внедрения новой технологии, повышающей износостойкость деталей

$$\Delta_{г.э.} = N W_1 \frac{C_1 W_{P2} - C_2 W_{P1}}{W_{P1} W_{P2}}$$

где  $N$  - количество ремонтируемых объектов;  $C_1, C_2$  - себестоимость ремонта объекта по старой и соответственно по новой технологии;  $W_{P1}, W_{P2}$  - среднегодовая наработка на один объект по старой и соответственно новой технологии;  $W_1$  - средняя плановая наработка на один объект.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолов Л.С., Кряжков В.М., Черкун В.Е. Основы надежности сельскохозяйственной техники. - М.: Колос, 1974. - 223 с.

2. Егоров В.И. Прогнозирование надежности и долговечности лесозаготовительного оборудования. - М.: Лесная промышленность, 1976. - 112 с.

3. Ротенберг Р.В. Основы надежности системы водитель-автомобиль-дорога-среда. - М.: Машиностроение, 1988. - 215 с.

4. Решетов Д.М., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. - М.: Высшая школа, 1988. - 238 с.

5. Броуде В.И., Семенов Л.К. Надежность подъемно-транспортных машин. - М.: Машиностроение, 1986. - 183 с.

#### ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Основные понятия, положения и определения ..	4
1.1. Объекты .....	4
1.2. Свойства продукции .....	5
1.3. Основные понятия и терминология .....	6
2. Статистическая оценка основных показателей надежности .....	11
2.1. Показатели безотказности .....	12
2.2. Показатели долговечности .....	18
2.3. Надежность и законы распределения случайных величин .....	20
3. Причины потери работоспособности и физическая сущность надежности лесотранспортных машин и	

оборудования .....	24
3.1. Причины потери работоспособности .....	24
3.2. Общие сведения о трении .....	26
3.3. Классификация видов трения и изнашивания .....	28
3.4. Закономерности изнашивания .....	30
3.5. Методы определения износа .....	31
3.6. Расчет деталей на износ .....	32
3.7. Определение износа машины .....	32
3.8. Разрушения и повреждения деталей и оборудования при отсутствии трения .....	33
4. Методы расчета лесных машин и оборудования на надежность .....	34
4.1. Вероятность безотказной работы по заданному критерию .....	34
4.2. Расчет по критерию прочности .....	36
4.3. Вероятность безотказной работы по критерию прочности .....	39
4.4. Теория подобия усталостного разрушения Серенсена-Когасева .....	41
4.5. Вероятность безотказной работы машин ....	42
4.6. Предельные состояния деталей, сопряжений и узлов машин по износу .....	45
4.7. Оптимальная долговечность .....	46
5. Методы испытаний машин и оборудования на надежность .....	47
5.1. Классификация методов испытаний .....	47
5.2. Планирование объема испытаний .....	49
5.3. Ускоренные испытания на надежность .....	50
5.4. Сущность технической диагностики машины. ....	52
6. Основные направления повышения надежности лесных машин и оборудования .....	53
6.1. Общие направления повышения надежности..	53
6.2. Специфика состояния вопросов надежности лесопромышленного оборудования .....	53
6.3. Обеспечение надежности .....	56
7. Экономическая эффективность повышения надеж- ности машин .....	59
7.1. Экономическая эффективность повышения	

надежности машин при их производстве и эксплуатации, .	59
7.2. Экономическая эффективность повышения надежности при восстановлении деталей .....	60
Литература .....	61

Учебное издание

Дуков Анатолий Васильевич  
НАДЕЖНОСТЬ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Редактор М. Ф. Мурашко. Корректор Н. М. Малаховский.

Подписано в печать 28.12.89 . АТ 13547 . Формат 60x84<sup>1</sup>/16.  
Печать офсетная. Усл.печ.л.3,9.Усл.кр.-отт.3,9. Уч.-изд.л.3,3.

Тираж 500 экз. Заказ 570. Цена 10 к.

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени технологический  
институт им. С.М.Кирова. 220630.Минск,Свердлова,13а.

Отпечатано на ретапринте Белорусского ордена Трудового  
Красного Знамени технологического института им. С.М.Кирова.  
220630. Минск,Свердлова,13.