С.Ю. Журавлёв

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Красноярск 2013

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет»

С.Ю. Журавлёв

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рекомендовано Сибирским региональным учебно-методическим центром высшего профессионального образования для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению 110800.62 «Агроинженерия», профили «Технические системы в агро-бизнесе», «Технический сервис в агропромышленном комплексе»

Красноярск 2013

ББК 40.72я73
Ж 91

Рецензенты:

В.А. Терсков, д-р техн. наук, проф. кафедры математики и информатики Красноярского института железнодорожного транспорта (филиала ИрГУПС)

Н.В. Петровский, канд. техн. наук, директор ГНУ КНИИСХ Россельхозакадемии

Ж 91 ***Журавлёв, С.Ю.*** **Надежность технических систем:** учеб. пособие / *С.Ю. Журавлёв*; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2013. – 331 с.

Учебное пособие содержит основные теоретические положения, методические указания, порядок выполнения практических работ. Для выполнения контрольных работ студентами заочного обучения приведены соответствующие методические указания, перечни вопросов по разделам дисциплины и варианты заданий.

Для промежуточного и итогового контроля степени усвоения материала студентами приведены тестовые задания по всем темам дисциплины.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 110800.62 «Агроинженерия», профили «Технические системы в агробизнесе», «Технический сервис в агропромышленном комплексе».

ББК 40.72я73

© Журавлёв С.Ю., 2013
© ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет», 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....4

Часть I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 6

1. Введение в предмет. Основные понятия и определения.....6
2. Показатели надежности технических систем. Математические и практические методы их определения.....24
3. Физические основы надежности.....56
4. Испытания машин на надежность. Принципы конструирования технических систем.....104
5. Методы повышения надежности машин.....142
6. Критерии оценки качества. Методы управления качеством продукции.....171

Часть II. ПРАКТИКУМ.....199

Практическая работа №1.....199
Практическая работа №2.....213
Практическая работа №3.....217
Практическая работа №4.....222
Практическая работа №5.....232
Практическая работа №6.....237
Практическая работа №7.....240
Практическая работа №8.....245
Практическая работа №9.....258
Практическая работа №10.....273
Практическая работа №11.....278
Практическая работа №12.....287

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....295

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»....311

ЗАКЛЮЧЕНИЕ……..328

ЛИТЕРАТУРА.....329

ВВЕДЕНИЕ

Развитие научно-технического прогресса, усложнение конструкций машин и интенсификация режимов их эксплуатации обуславливают необходимость повышения надежности технических систем. Решение этой проблемы − это огромный резерв повышения эффективности производства и производительности труда.

Особенностью проблемы повышения надежности является ее связь со всеми этапами проектирования, изготовления и использования машины, начиная с момента, когда формируется и обосновывается идея создания новой машины, и кончая принятием решения об ее списании. Необходимо выявление связи между показателями надежности и возможностями по их повышению на каждом из этапов проектирования, изготовления и эксплуатации машины. Эффективность использования сельскохозяйственной техники определяется не только конструктивно-технологическими решениями, заложенными в процессе изготовления, но и условиями ее эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Теория надежности машин и систем развивается относительно недавно и поэтому не может претендовать на законченность. Некоторые вопросы этой теории еще недостаточно разработаны и нуждаются в уточнении. Имеющиеся опубликованные неполные статистические данные об уровне надежности различных типов эксплуатируемых машин и систем в настоящее время в связи с интенсивным развитием новых методов проектирования и производства уже недостаточно полно отражают фактическое состояние проблемы надежности, в особенности на фоне совершенствования конструкций, появления новых материалов для них и т.д. Теория надежности машин и систем охватывает широкий круг вопросов, отражающих общую теорию надежности, вопросы проектирования, технологии производства и эксплуатации этих систем. В связи с этим ознакомление с этой проблемой требует знаний в области конкретных изделий и математической подготовки.

На практике инженеру сельскохозяйственного

производства постоянно приходится оценивать надежность эксплуатируемой техники по всем ее составляющим. Настоящее учебное пособие позволяет закрепить теоретические знания и приобрести практические навыки в определении значений этих составляющих в реальных условиях эксплуатации техники, приобрести компетенции по осуществлению мероприятий, направленных на поддержание и восстановление работоспособности и ресурса сельскохозяйственной техники.

В учебном пособии представлен достаточный объем теоретических данных, приведены методические указания для выполнения практических работ по надежности технических систем. Учитывая существенные особенности организации подготовки студентов заочного обучения, в работе приведены рекомендации по изучению дисциплины в межсессионный период, вопросы и методические указания для самостоятельной подготовки по дисциплине и выполнения контрольной работы.

Для более глубокого изучения дисциплины в пособии рекомендован список необходимой специальной технической литературы.

ЧАСТЬ I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1. ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Основные понятия о надежности и ремонте машин

Любой анализ надежности машин должен основываться на точных, определенных понятиях. В нашей стране установлена достаточно четкая терминология надежности, выпущен ряд стандартов, дающих однозначные толкования и определения понятий, относящихся к качеству продукции вообще и надежности в частности.

При изучении надежности технических устройств рассматриваются самые разнообразные объекты. При этом под объектом понимается предмет определенного целевого назначения, рассматриваемый в период проектирования, изготовления, эксплуатации, исследования и испытаний на надежность. Для машиностроения объектом рассмотрения являются его изделия, а продукцией – сельскохозяйственные машины и орудия. В зависимости от поставленной задачи изделием может быть отдельная деталь, кинематическая пара, узел, агрегат, машина в целом или система машин. Каждое изделие характеризуется выходными параметрами – величинами, определяющими показатели качества данного изделия.

Выходные параметры характеризуют самые разнообразные свойства изделия в зависимости от его назначения и тех требований, которые к нему предъявляются. Это могут быть показатели точности функционирования, механические и прочностные характеристики, кинематические и динамические параметры, экономические показатели и др. Допустимое значение выходных параметров оговаривается в

нормативных документах (стандартах, ТУ).

Качество машин – совокупность их свойств, обусловливающих пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.

Если понятие «качество» расчленить на составляющие, то к ним можно будет отнести следующие основные показатели:

1) показатели назначения, характеризующие приспособленность изделий к использованию их по назначению (мощность, производительность, маневренность, КПД и пр.);

2) показатели надежности (долговечность, безотказность, ремонтопригодность, сохраняемость);

3) показатели технологичности, характеризующие эффективность конструкции и технологию ее производства;

4) экономические показатели, отражающие затраты на разработку, изготовление, использование изделий и экономическую эффективность их эксплуатации (например, интегральный показатель);

5) показатели стандартизации и унификации, характеризующие степень использования стандартных узлов;

6) экологические показатели, характеризующие систему «человек – изделие – среда», т.е. комплекс гигиенических, физиологических, психологических и других свойств;

7) эстетические показатели, охватывающие такие свойства, как красота форм, оригинальность, выразительность, гармоничность, соответствие среде и др.;

8) патентно-правовые показатели, определяющие патентную чистоту изделия.

Таким образом, надежность является одним из свойств машины, определяющих ее качество.

Надежность машин отражает изменения их свойств во времени в процессе эксплуатации. Основные понятия надежности определены ГОСТ 27.002-83.

Надежность есть свойство объекта (машины или ее составной части, агрегата, узла, детали и т.п.) сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, ТО, ремонтов, хранения и транспортирования.

Остановимся на основных понятиях и терминах проблемы

надежности в соответствии с тем, как это трактуется в документах. Все основные термины в соответствии с ГОСТом и другими источниками (а их 89) классифицируются по четырем группам (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация терминов надежности

Объекты	Состояния и события	Свойства	Количественные показатели
Изделия: машина, агрегаты, узлы, детали, приборы, сборочные единицы	Исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное	Надежность, безотказность, долговечность, ремонтопригодность	*Единичные:* Вероятность безотказной работы
Элементы	Повреждение		Наработка на отказ
Часть системы, предназначенная для выполнения заданных функций	Отказ, предельное состояние	Сохраняемость	Средний ресурс, средний срок сохраняемости, вероятность восстановления
Системы: совокупность совместно действующих элементов			*Комплексные:* Коэффициент готовности, коэффициент технического использования

Надежность машин – сложное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетания следующих свойств: безотказности, долговечности, ремонтопригодности, сохраняемости.

Из рассмотрения содержания проблемы надежности машин следует, что это свойство характеризуется в первую очередь способностью выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах в соответствии с ТУ. Эти характеристики являются функцией большого числа факторов – конструктивного, производственно-технологического и

эксплуатационного. Не уменьшая роли и влияния на уровень надежности машин основных факторов, следует сказать, что все свойства машин, в том числе и показатели их надежности, создаются и закладываются при конструировании машины, ее изготовлении, проявляются и используются в процессе эксплуатации и частично возобновляются при ремонте.

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

Надежность – одна из главных оценок качества и эксплуатационных характеристик сельскохозяйственной машины. Она является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени, или некоторой наработки.

Основной показатель безотказности – вероятность безотказной работы. Это вероятность того, что в интервале времени от 0 до t отказ не наступит, т.е. вероятность того, что отказ наступит в интервале времени от t до ∞.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – функция времени.

$$P(t) = \int_{t}^{\infty} f(t) \cdot dt. \qquad (1)$$

Показатель безотказности определяет шанс изделия проработать без отказов заданный интервал времени. Допустимое значение $P(t)$ выбирается в зависимости от степени опасности отказа. Например, для ответственных деталей машин авиационной техники $P(t)$ = 0,9999 → 1. В таблице 2 представлена классификация машин по надежности в зависимости от последствий, к которым может привести их отказ.

Таблица 2 – Классификация машин по вероятности безотказной работы

Последствия отказа	Допустимая вероятность безотказной работы	Тип машин
1	2	3
Катастрофические: авария, катастрофа, невыполнение ответственного задания	$P(t) \to 1$	Летательные аппараты, подъемно-транспортные машины, машины химического производства

Окончание таблицы 2

1	2	3
Экономический: повышенные потери времени от простоев, работа на пониженных режимах с ухудшенными параметрами	Значительный ущерб: $P(t) \geq 0{,}99$, незначительный ущерб: $P(t) \leq 0{,}9$	Технологическое оборудование, с.-х. и бытовые машины
Без последствий, затраты на ремонт в пределах нормы	$P(t) \leq 0{,}9$	Отдельные узлы и элементы машин

По статистическим данным вероятность безотказной работы машин определяется по формуле

$$P(t) = \frac{N_o - n(t)}{N_o} = 1 - \frac{n(t)}{N_o}, \qquad (2)$$

где N_0 – число объектов; $n(t)$ – число отказов объектов за время.

Достоинство показателя безотказности – возможность достаточно просто судить о надежности.

Безотказность машин меняется во времени или по мере увеличения наработки, и этот процесс изменения имеет свои закономерности, которые изучаются и оцениваются в соответствии с теорией надежности (рисунок 1).

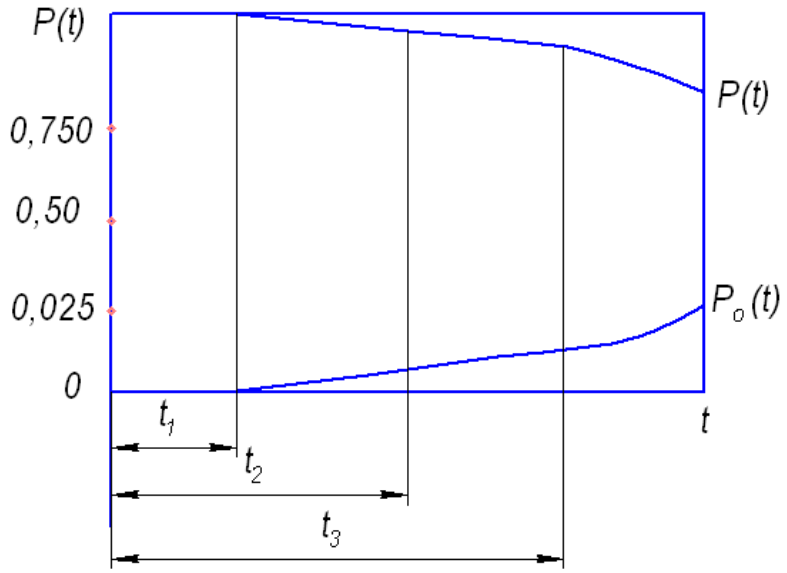


Рисунок 1 – Зависимость вероятности безотказной работы машин $P(t)$ от времени эксплуатации

На рисунке 1 показана кривая вероятности отказов $P_o(t)$, которая симметрична по отношению к $P(t)$ и показывает вероятность того, что при определенных условиях в заданном интервале времени возникает хотя бы один отказ.

При определении показателей безотказности учитывают последствия, к которым приводят отказы, и склонность к восстановлению работоспособности путем подразделения отказов на три группы сложности.

I группа – отказы, устраняемые ремонтом или заменой деталей, расположенных снаружи узлов и агрегатов, без их разборки, а также отказы, устранение которых требует внеочередного проведения операций ТО-1 и ТО-2.

II группа – отказы, устраняемые ремонтом или заменой легкодоступных узлов и агрегатов, а также те, устранение которых требует раскрытия внутренних полостей основных агрегатов без их разборки или внеочередного проведения операций ТО-2.

Для устранения отказов III группы необходима разборка или расчленение основных агрегатов.

Показатели безотказности рассчитывают как общие, так и по группам сложности (таблица 3).

Таблица 3 – Нормативы безотказности тракторов до капитального ремонта

Марка трактора	Допустимое среднее число отказов на 1000 мото-ч по группам сложности		
	1	2	3
К-701	4,36	3,13	0,73
Т-150К	4,83	3,16	0,83
Т-4А	5,0	4,23	0,76
ДТ-75М	4,5	3,0	0,8
МТЗ-80	4,0	2,3	0,5

Ремонтопригодность – свойство изделия, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения ТО и ремонта.

Ремонтопригодность машин должна рассматриваться как одно из важнейших требований к современной технике,

предполагающее минимальные затраты труда, времени, средств на выполнение работ по поддержание, контролю и восстановлению работоспособности машин.

Затраты на ремонт и ТО в 4-6 раз превышают стоимость машин при их производстве. На долю заводов, выпускающих новые тракторы, приходится лишь 22% производственных мощностей, на долю заводов, изготовляющих запасные части к тракторам, – 34%, на долю ремонтных предприятий – 44%. То есть на ремонт тракторов затрачивается почти в 4 раза больше производственных мощностей, чем на выпуск новых.

В таком же примерно соотношении находится и количество специалистов, занятых изготовлением, обслуживанием и ремонтом машин. Все это в значительной степени является результатом точной надежности выпускаемой техники.

Для организации рациональной эксплуатации машин, оптимизации их ТО и ремонта необходимы максимально возможная унификация, конструктивная законченность, отделимость и технологичность их агрегатов, узлов и деталей.

В качестве главных при производстве машин должны рассматриваться требования, влияющие на выбор организационных методов и технологий ремонта.

Профессор В.И. Казарцев предложил пять основных требований к производству, учитывающих несовершенство машин и отношение их приспособленности к ТО и ремонту.

Первая конструктивная особенность – конструктивная законченность и достаточно легкая отделимость агрегатов машины.

Вторая – конструктивная законченность и достаточная легкая отделимость узлов в агрегатах машины.

Третья – степень конструктивной и технологической доработанности агрегатов в отношении срока службы их деталей и узлов.

Четвертая – унификация узлов, агрегатов и деталей, различных марок машин.

Пятая особенность – степень обеспечения быстро изнашивающихся сопряжений машин легкосъемными деталями в виде втулок, колец, вкладышей.

Не менее важное значение имеют технологические ремонтные требования к конструкции машин, которые можно

разделить на две группы: возникающие при разборочно-сборочных работах и требования к конструкции отдельных сопряжений и деталей.

Под ремонтопригодностью машин понимается такое свойство конструкции машин, которое выражается в их приспособленности к работам, выполняемым при ТО и ремонте (рисунок 2).

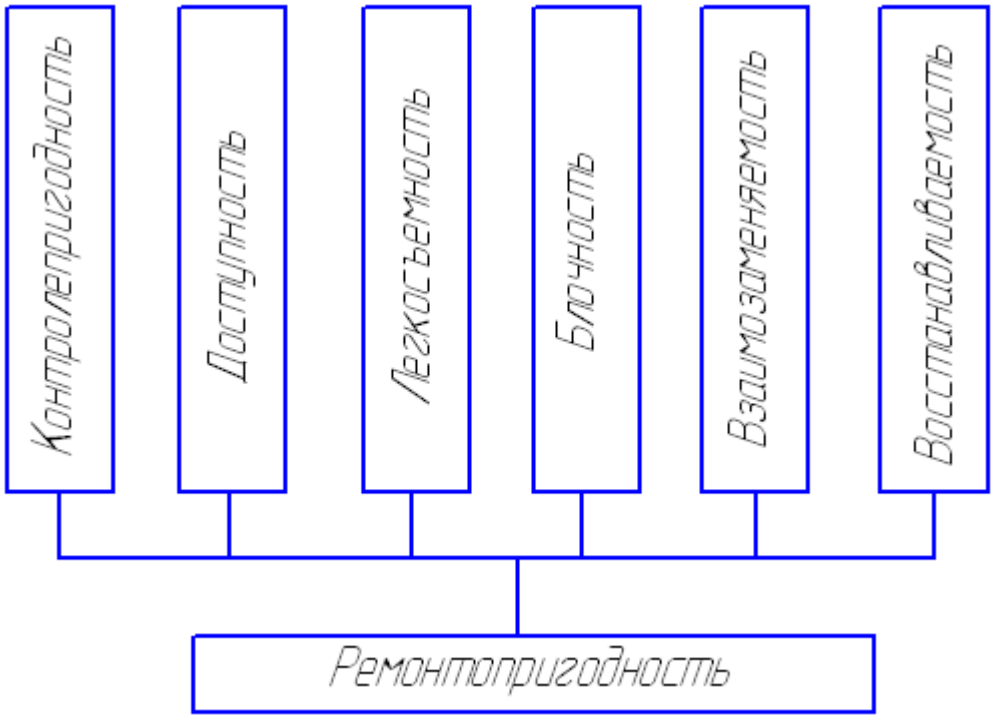


Рисунок 2 – Структура ремонтных свойств машин

К числу показателей ремонтопригодности относятся оперативные показатели (среднее время восстановления, вероятность восстановления в заданное время) и экономические показателя (средние и удельные затраты, труда и денежных средств на ТО и ремонт), а также комплексные показатели надежности – коэффициент готовности и коэффициент технического использования.

Под средним временем восстановления $T_в$ понимают математическое ожидание времени восстановления работоспособности. При известном законе распределения среднее время восстановления определяется по формуле

$$T_{в} = \int_{0}^{t} f / t / t_{в} dt. \quad (3)$$

При оценке среднего времени восстановления по статическим данным, полученным в результате испытаний, показатель находится по формуле

$$T_{в} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} t_{вi}, \quad (4)$$

где m – количество отказов, наблюдаемых в процессе эксплуатации; $t_{вi}$ – время устранения i-го отказа.

Вероятность восстановления машин в заданное время

$$P_{в}(t) = \int_{0}^{t} f(t)dt.$$

Определение вероятности восстановления $P_{в}(t)$ требует значения закона распределения времени восстановления. В качестве математической модели времени восстановления наиболее часто используют следующие виды функций распределения времени восстановления машин: экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, нормальное распределение.

Конкретный вид функции $P_{в}(t)$ определяется конструктивными особенностями типа машин и условиями их восстановления.

Интенсивность отказа – это вероятность отказа изделия в единицу времени после момента t при условии, что отказа до момента t не поступило.

Интенсивность отказа изделий – условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия для рассматриваемого момента времени.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (5)$$

Интенсивность отказов изделий можно определить по приближенной формуле

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}, \quad (6)$$

где $N(t)$ – число изделий, оставшихся в работоспособном состоянии до наработки t; Δt – принятый интервал времени.

Важным показателем безотказности сельскохозяйственных машин является параметр потока отказов. В этом случае отказавшие элементы заменяют на исправные, и работоспособность изделия восстанавливается, т.е. наблюдаются поток отказов и поток восстановления.

Параметр потока отказов – это плотность вероятности возникновения отказов восстанавливаемого изделия. Определяется для рассматриваемого момента времени или наработки, определяется по формуле

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}, \quad (7)$$

где H – предел функции потока отказов.

Для сельскохозяйственных машин применяется среднее значение параметра потока отказов за какой-либо период:

$$\omega(t) = \frac{m_{cp}(t + \Delta t) - m_{cp}(t)}{\Delta t}. \quad (8)$$

Безотказность – это непрерывное работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки, а долговечность предусматривает перерывы в эксплуатации, связанные с ТО и ремонтом.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и ремонта.

Количественно долговечность оценивается с помощью двух групп показателей: ресурса как показателя, связанного с наработкой изделия, и срока службы.

Ресурс – наработка (продолжительность или объем работы) изделия от начала эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации изделия от ее начала или возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Нормируемыми показателями долговечности для

сельскохозяйственных машин являются средний и гамма-процентный ресурс, срок службы до списания.

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса изделия.

Гамма-процентный ресурс – наработка, в течение которой изделие не достигает предельного состояния с заданной вероятностью процентов. Для сельскохозяйственных машин принята регламентированная вероятность γ= 80%, соответствующий этому значению ресурс называется 80%.

Ниже приведены нормативные значения долговечности основных машин, используемых в сельскохозяйственном производстве (лет):

Тракторы:
К-700А, К-701 ……..……10
Т-4А.....……8
Т-130.....……..11
ДТ-75М …….....……8
МТЗ-80, -82.....……10
Комбайны Енисей-1200-1……13
Плуги общего назначения.....8
Культиваторы, лущильники,
бороны .....…….. 7
Сеялки.....……8

Одним из основных показателей долговечности является доремонтный ресурс машин.

Проведенные исследования доремонтной наработки тракторов Т-4А, поступавших на Усть-Абаканское ремонтное техническое предприятие в первый капитальный ремонт, показали, что значения средних ресурсов до первого капитального ремонта составляют: 4000 мото-ч, σ – 770 мото-ч, v – 0,2.

Результаты статистической обработки приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Статистический ряд распределения доремонтного ресурса тракторов Т-4А

Интервалы наработки, мото-ч	Значения показателей по частичным интервалам						
	2,25 – 2,75	2,75 – 3,25	3,25 – 3,75	3,75 – 4,25	4,25 – 4,75	4,75 – 5,25	5,25 – 5,75
Частоты m_i	4	7	11	16	12	9	1
Частости m_i / N	0,066	0,11	0,18	0,26	0,2	0,15	0,16

Накопленные частости $\Sigma m_i / N$	0,066	0,176	0,36	0,62	0,82	0,97	1,0
Плотность распреления $f(t)$	0,658	0,12	0,22	0,25	0,19	0,9	0,032
Интегральная распределительная функция $F(t)$	0,07	0,27	0,56	0,86	0,96	0,99	1,0

На рисунке 3 показаны полигон и теоретическая кривая распределения ресурсов до первого капитального ремонта тракторов. Центр распределения определен средним значением, т.е. является точечной оценкой среднего доремонтного ресурса трактора.

Вопросы повышения долговечности неразрывно связаны с изнашиванием деталей машин в процессе эксплуатации.

Изучение количественных характеристик износа деталей трактора дает возможность обосновать рациональные технологические процессы и способы восстановления деталей, а также установить закон распределения износа деталей и сопряжений, соответствующий условиям эксплуатации трактора, а на его основе прогнозировать долговечность.

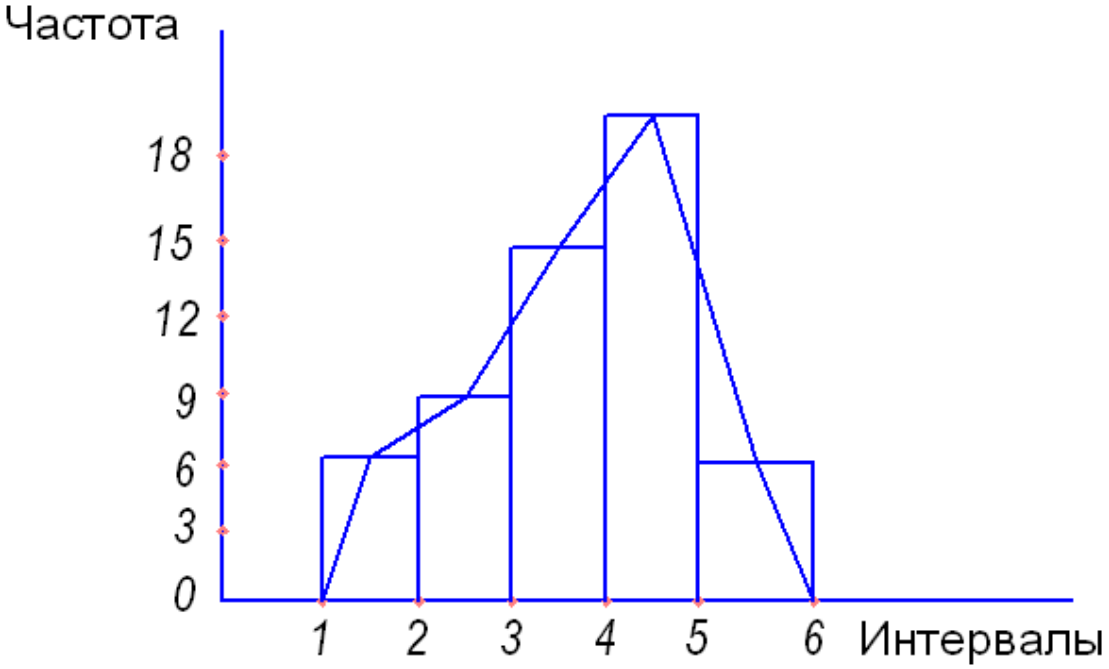


Рисунок 3 – Опытная гистограмма, полигон распределения доремонтной наработки трактора Т-4А

При классификации машин по долговечности указывают в первую очередь причины, связанные с выходными параметрами машины, приводящие к необходимости направлять машину в ремонт.

Именно потеря основных показателей качества машины определяет как ее ресурс до капитального ремонта, так и затраты времени и средств, необходимые для восстановления работоспособности машины (таблица 5). Обычно главные выходные параметры всей машины, характеризующие ее эффективность, точность функционирования, КПД, производительность и др.), обеспечиваются работоспособностью многих узлов и механизмов машины. Поэтому восстановление основных характеристик машины требует существенных затрат, величина которых является критерием для назначения ресурса до планового ремонта.

Таблица 5 – Классификация машин по долговечности

Категория машин	Назначение	Тип машин	Основные параметры, определяющие работоспособность машины
Технологические	Изменение формы и свойств объекта труда	Станки, прессы, сварочные машины, с.-х., дорожные, строительные машины	Качество продукции, производительность
Химико-технологические	Получение новых материалов	Металлургические комплексы	Качество продукции, производительность, безопасность
Транспортные	Перемещение объекта	Автомобили, подъемно-транспортные машины и др.	Скорость, безопасность, грузоподъемность
Энергетические	Преобразование энергии	Электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания, турбины	КПД, мощность
Контрольно-	Контроль	Измерительные	Точность

измерительные	параметров объекта	приборы, ма-шины	измерений
Счетно-решающие	Решение математических задач	ЭВМ	Правильность решения
Военные	Поражение объекта	Орудия, ракеты, танки, авиация	Выполнение боевого задания
Медицинские	Восстановление здоровья человека и животных	Искусственные органы, агрегаты	Точность функционирования, безотказность

При назначении показателей долговечности машины общий методический подход должен сочетаться с особенностями конструкции, условиями и методами эксплуатации машины.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность изделия выполнять требуемые функции в течение и после хранения или транспортирования.

Основными показателями сохраняемости являются средний и гамма-процентный срок сохраняемости. Последний определяют как сохраняемость, которая будет достигнута машиной с заданной вероятностью гамма-процентов.

Для поддержания машин в работоспособном состоянии проводятся подготовка к хранению, ТО во время него и снятия с хранения.

Нормативные затраты труда на ТО при хранении сельскохозяйственных машин приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Затраты труда на ТО при хранении сельскохозяйственных машин, чел. ч

Наименования и марки машин	Подготовка к хранению	ТО в период хранения	Снятие с хранения
Тракторы: К-700А, К-70I	18,2	0,7	7,6
Т-4А	9,2	0,93	11,6
ДТ-75М	6,0	0,6	7,0
МТЗ-80, - 82	7,0	0,7	7,5
Зерноуборочный комбайн Енисей-1200-1	16,9	0,7	22,7
Плуг ПЛН-5-35	0,9	0,3	0,8
Лущильник ЛДГ-15	3,0	0,2	2,0
Борона БДТ-10	1,3	0,2	1,0
Сеялка СЗП-3,6	2,4	0,45	1,8
Косилки тракторные	1,0	0,2	0,5
Пресс-подборщик ПР-200	5,0	0,4	4,0

Во время планирования объема ремонтных работ и проектирования ремонтно-обслуживающей базы на первый план выдвигаются вопросы долговечности и ремонтопригодности машин.

При расчетах, связанных с выполнением технологических сельскохозяйственных операций в оптимальные агротехнические сроки, большое внимание приходится уделять безотказности машин. Создание машинных дворов и проектирование их оборудования должны учитывать сохраняемость используемых машин.

Надежность машин оценивается по совокупности свойств, называемых показателями надежности. Каждое из свойств, определяющих уровень надежности изделия, характеризуется определенной группой показателей.

Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств, соответствующих надежности изделия.

Различают единичные и комплексные показатели надежности.

Единичный – показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность изделия (безотказность, долговечность, ремонтопригодность или сохраняемость).

Комплексный – показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность изделия.

Из комплексных показателей надежности сельскохозяйственных машин наиболее часто используют коэффициенты готовности и технического использования.

Коэффициент готовности $K_г$ показывает вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Значение $K_г$ вычисляют по формуле

$$к_г = \frac{T_p}{T_p + T_в}, \quad (9)$$

где T_p – суммарное время пребывания изделия в работоспособном состоянии; $T_в$ – суммарное время восстановления работоспособного состояния изделия после отказов.

Другое равенство для расчета $K_г$ включает наработку в условных эталонных гектарах (у.э.га) и среднее время

восстановления.

$$к_{г} = \frac{\mu \cdot T_{о}}{\mu T_{о} + T_{вс}}, \quad (10)$$

где $T_{о}$ – средняя наработка на отказ, у.э.га; $T_{вс}$ – среднее время восстановления работоспособности после отказа, ч; μ – средний коэффициент перевода единицы наработки в единицу времени.

Значения коэффициентов перевода наработки в единицы времени для тракторов (ч/у.э.га):

К-701 …….....0,48;
Т-4А ……0,69;
Т-130……0,75;
ДТ-75М .....…… 0,91;
МТЗ-80……..1,82.

Коэффициент готовности характеризует одновременно два различных свойства надежности объекта – безотказность и ремонтопригодность.

Коэффициент технического использования $К_{и}$ – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания изделия в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации и математическому ожиданию суммарного времени пребывания изделия в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом, за этот же период:

$$к_{и} = \frac{\mu \cdot T_{р}}{\mu T_{р} + T_{пр} + T_{вр}}, \quad (11)$$

где $T_{р}$ – суммарная наработка; $T_{пр}$ и $T_{вр}$ – суммарное время простоев из-за плановых и внеплановых ремонтов и ТО.

Коэффициент технического использования $К_{и}$ – обобщенный комплексный показатель надежности и более полная характеристика ремонтопригодности, чем коэффициент готовности, так как учитывает все простои, связанные с ТО и

ремонтом.

Коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ – вероятность того, что изделие, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Если вероятность безотказной работы объекта $P(t)$ в течение времени t_p не зависит от момента начала работы t , то $K_{ог}$ можно определить по формуле

$$K_{ог} = K_{г} \cdot P(\quad). \qquad (12)$$

Коэффициент оперативной готовности используют в случае, когда необходимо характеризовать надежность техники в период уборки урожая, заготовки кормов, автомобильных перевозок и т.д.

Коэффициенты готовности машин, используемых в сельскохозяйственном производстве, приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Коэффициенты готовности с.-х. машин в зависимости от условий эксплуатации

Машины	Эксплуатация	
	реальная	нормальная
Тракторы: универсальные пропашные	0,88-0,93	0,97-0,99
общего назначения	0,85-0,9	0,95-0,98
Плуги: общего назначения	0,84-0,88	0,92-0,96
для каменистых почв	0,92-0,95	0,97-0,98
Сеялки зерновые	0,78-0,85	0,9-0,95
Сажалки	0,8-0,85	0,92-0,96
Комбайны: зерноуборочные	0,75-0,8	0,88-0,92
картофелеуборочные	0,72-0,76	0,86-0,9
Разбрасыватели органических удобрений	0,9-0,95	0,95-0,9

Для повышения эффективности использования сельскохозяйственных машин необходимо свести к минимуму простои и эксплуатационные расходы машин, уменьшить

количество ремонтов и ТО, упростить и удешевить ТО и ремонт и т.д. Все это связано с качеством и надежностью машин. Поэтому, чем выше эти показатели, тем эффективнее работают сельскохозяйственные машины.

Вопросы качества и надежности неразрывно связаны с экономикой. Экономические показатели при оценке надежности весьма важны, так как повышение безотказности и долговечности машин связано с дополнительными материальными затратами. Поэтому экономика является основным критерием при решении большинства практических вопросов надежности. Ведь современный уровень развития надежности позволяет практически достичь любых показателей качества и надежности изделия, и все дело заключается в затратах на достижение поставленной цели. Эти затраты могут быть столь высоки, что эффект от повышенной надежности не возместит их, и суммарный результат от проведенных мероприятий будет отрицательным.

Критерием надежности машин, с экономической точки зрения, может служить сумма затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией машины, отнесенная к продолжительности ее эксплуатации.

$$к_э = \frac{Q_{изг} + Q_{эксп}}{T_э}, \qquad (13)$$

где $K_э$ – экономический показатель надежности, р/ч; $Q_{изг}$ – стоимость изготовления новой машины, р.; $Q_{эксп}$ – суммарные затраты на эксплуатацию, ТО, ремонт машины, р.; $T_э$ – период целесообразной эксплуатации машины, ч.

Следует стремиться к минимальному значению этого показателя за счет рационального распределения капиталовложений между сферой производства и сферой эксплуатации машин.

Повышая качество и надежность, мы снижаем издержки хозяйств, эксплуатирующих технику. Но приходится затрачивать больше средств на ее создание. Поэтому качество и надежность должны быть оптимальными, при которых суммарные удельные затраты, связанные с проектированием, созданием, эксплуатацией и ремонтом

машин, являются минимальными. Это особенно важно в связи с переходом на рыночную экономику.

Таким образом, зная экономические и технические показатели надежности, потребитель на этой основе может решить ряд инженерных вопросов, связанных с эксплуатацией, ТО и ремонтом сельскохозяйственных машин.

2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Основные характеристики надежности носят вероятностный характер и оцениваются статистически на основании информации о надежности. Эта оценка сводится к определению количественных показателей надежности машин. Сбор, обработка и анализ информации о надежности связаны с необходимостью исследования случайных событий. При этом приходится иметь дело с большим количеством сообщений о случайных явлениях, для изучения которых используется теория вероятностей и математической статистики.

Основным понятием теории вероятностей является понятие случайного события – события, которое может произойти или не произойти в результате испытаний.

Современные сельскохозяйственные машины состоят из разнообразных узлов, в которых используется механические, гидравлические, пневматические, электрические, радиоэлектронные узлы и устройства с присущими им специфическими свойствами и условиями работы. Выход машин из строя обусловлен многими причинами – износом, усталостью металла, коррозионными повреждениями, внезапными поломками в результате динамических нагрузок, которые носят случайный характер.

При анализе факторов, влияющих на надежность машин, различают факторы субъективные и объективные. Объективные – это воздействия окружающей среды, механические, физические, химические (изнашивание, старение, температура, нагрузки, деформации и др.). Субъективные – зависят от деятельности человека. Это выбор схемы и конструкционного решения при проектировании; установление элементов, входящих в машину; выбор материалов; назначение режимов нормальной эксплуатации; организация ТО и ремонта; выбор режимов обкатки и испытания машин; обоснование и разработка технологических процессов на изготовление или ремонт деталей и сборку машин.

Поскольку время проявления отказа при эксплуатации машин и время на его устранение является случайными

событиями, то задача определения количественных показателей надежности требует операции со случайными величинами, случайными функциями и, следовательно, базируется на применении методов теории вероятностей и математической статистики. Научная ценность теории вероятностей состоит в том, что она дает правила, по которым вероятности сложных событий можно определить с помощью вероятностей простых событий, вычисляемых значительно легче на основании опыта или некоторых теоретических соображений.

Основные понятия и определения из теории вероятности

Случайные события – это события, которые в результате производственного опыта могут произойти или не произойти. Обозначим случайное событие символом A.

Достоверное событие – это такое событие, которое непременно должно произойти. Обозначим достоверное событие символом E.

Невозможное событие – это такое событие, которое заведомо не может произойти. Обозначим невозможное событие символом C.

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

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

Противоположные события относительно некоторого выбранного события A – это события, состоящие в непоявлении этого события. Обозначим противоположное событие символом $\bar{A}$.

Полная группа событий – это такая совокупность событий, что в результате опыта обязательно должно произойти хотя бы одно из событий этой совокупности.

Вероятность события – числовая характеристика степени возможности реализации случайного события в определенных условиях.

Вероятность события $P(A)$ – отношение числа благоприятствующих этому событию исходов к общему числу всех единственно возможных и равновозможных исходов испытания, образующих полную группу.

$$P(A) = \frac{m}{n}, \tag{14}$$

где m – число случаев, благоприятствующих наступлению события A; n – число всех возможных элементарных исходов испытания, т.е. вероятность есть число, характеризующее степень возможности появления события.

Основные свойства вероятности:

1. Вероятность достоверного события равна единице. В этом случае $m = n$.

$$P(A) = \frac{m}{n} = \frac{n}{n} = 1. \tag{15}$$

2. Вероятность невозможного события равна нулю. В этом случает $m = 0$.

$$P(A) = \frac{m}{n} = \frac{0}{n} = 0. \tag{16}$$

3. Вероятность случайного события есть положительное число, заключенное между нулем и единицей. В этом случае $0<m>n$, а значит:

$$0 < \frac{m}{n} < 1 \tag{17}$$

и, следовательно, вероятность любого события выражается неравенством

$$0 \le P(A) \le 1. \tag{18}$$

Случайные величины бывают дискретными и непрерывными.

Дискретной (прерывной) называют случайную величину, которая может принимать отдельные, изолированные возможные значения с определенными вероятностями.

Непрерывной называет величину, которая может принимать все значения из некоторого конечного или

бесконечного промежутка.

Теорема сложения вероятностей. Вероятность появления одного из двух несовместных событий (безразлично, какого) равна сумме вероятностей этих событий.

$$P(A + B) = P(A) + P(B). \quad (19)$$

Сумма вероятностей событий $A1, A2, A3, A4$, образующих группу, равна единице.

$$\sum_{i-1}^{n} P(A) = 1. \quad (20)$$

Сумма вероятностей противоположных событий равна единице.

$$P(A) + \bar{P}(A) = 1. \quad (21)$$

Противоположными называют два единственно возможных события, образующие полную группу $A:\bar{A}$; если вероятность одного из противоположных событий обозначить через P, вероятность другого – через g, то, в соответствии с теоремой:

$$P + g = 1. \quad (22)$$

Таким образом, теорема сложения вероятностей применима к любому числу несовместных событий. Ее удобно записать в виде

$$P\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\right) = \sum_{i=1}^{n} P\left(A_i\right). \quad (23)$$

Теорема умножения вероятностей. Вероятность совместного появления двух событий A и B в данном опыте равна вероятности одного из них, умноженной на условную вероятность другого, вычисленную в предположении, что первое событие появилось, т.е.

$$P(AB) = P(A) \cdot P_A(B). \quad (24)$$

В теории надежности машин широко используется

теорема вероятности независимых событий. Она может быть обобщена на случай произвольного числа событий. В общем виде она формулируется так: вероятность произведений нескольких событий равна произведению вероятностей этих событий, причем вероятность каждого следующего по порядку события вычисляется при условии, что все предыдущие имели место.

$$P\left(A_1; A_2; A_3 ... A_n\right) = P\left(A_1\right) \cdot P\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \cdot P\left(\frac{A_3}{A_2 A_1}\right) ... P\left(A_n \left(A_1 A_2 ... A_{n+1}\right)\right). \quad (25)$$

В случае независимых событий теорема упрощается и принимает вид

$$P\left(A_1, A_2, ... A_n\right) = P\left(A_1\right) \cdot P\left(A_2\right) ... P\left(A_n\right), \quad (26)$$

т.е. вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий

$$P\left(\prod_{i=1}^{n} A_i\right) = \prod_{i=1}^{n} P\left(A_i\right). \quad (27)$$

Обобщением формул умножения и сложения вероятностей служит формула полной вероятности

$$P\left(A_0\right) = \sum_{i=1}^{n} P\left(A_i\right) \cdot P\left(\frac{A_0}{A_i}\right). \quad (28)$$

Первичная обработка опытной информации о надежности машин

Оценка надежности машин при помощи математических методов на основании накопленной статистической информации об их работе в реальных условиях эксплуатации позволяет выявить вероятностные закономерности и соотношения между случайными факторами, в различной мере влияющими на работоспособность, безотказность и долговечность машин.

Методы исследования основаны на том, что отказ – случайное событие и для его предупреждения необходимо знать физические причины и закономерности возникновения его и развития.

Основными этапами математической обработки являются:

1. Полученные в результате наблюдения случайные величины сводятся в таблицу в порядке возрастания показателя надежности, т.е. составляется вариационный ряд.

2. Составляется статистический ряд исходной информации. Для упрощения расчетов при повторении опыта не менее 20...25 раз составляется статистический ряд опытной информации. При его построении всю полученную информацию разбивают на n интервалов. Интервалы должны быть одинаковыми и удобными по величине, прилегать друг к другу и не иметь разрывов. Количество интервалов можно определить по зависимости

$$n = \sqrt{N}\,, \qquad (29)$$

где N – количество машин, участвующих в исследовании.

Применительно к оценке показателей надежности с.-х. машин количество интервалов должно быть в пределах $6<n<12$.

Статистический ряд информации обычно состоит из четырех горизонтальных строк:

1. Указываются границы интервалов опытной информации.
2. Количество случаев в каждом интервале (частота m_i).
3. Опытная вероятность появления показателя в каждом интервале $P_i = \frac{m_i}{N}$.
4. Накопленная вероятность $\sum_{i=0}^{n} P_i$.

Для примера в таблице 8 представлен статистический ряд распределения доремонтного ресурса гильзы цилиндров двигателя.

При анализе экспериментальных данных, исследовании распределения случайных величин приходится использовать

статистические характеристики.

Важнейшей характеристикой является среднее значение показателя надежности. Точность определения его возрастает по мере увеличения повторности информации, приближаясь к своему пределу – математическому ожиданию.

Таблица 8 – Статистический ряд распределения доремонтного ресурса гильзы

Частичные интервалы, тыс. мото-ч	0,5-1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5
Середины интервалов, тыс. мото-ч	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Частоты	5	30	20	9	6
Частости	0,0715	0,4285	0,2858	0,1285	0,0857
Накопленные частости	0,0715	0,5000	0,7858	0,9143	1,0000

При наличии статистического ряда среднее значение показателя надежности определяется по зависимости

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^{n} t_{ic} \cdot P_i, \qquad (30)$$

где n – количество интервалов статистического ряда; t_{ic} – значение середины i-го интервала; P_i – опытная вероятность i-го интервала.

Основными характеристиками рассеяния случайных величин является дисперсия этих наличии, которая определяется по выражению

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(t_i - \bar{t} \right)^2}{N-1} \quad . \qquad (31)$$

За меру рассеяния принимают среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(t_i - \bar{t} \right)^2}{N-1}} \, . \qquad (32)$$

При N > 25 и наличии статистического ряда

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(t_{ic} - \bar{t} \right)^2 \cdot P_i} \,. \qquad (33)$$

Дисперсия и среднее квадратическое отклонение являются абсолютными характеристиками рассеяния этого показателя надежности.

Степень рассеяния случайной величины определяется безразмерной характеристикой – коэффициентом вариации

$$v = \frac{\sigma}{\bar{t} - t_{см}} \,, \qquad (34)$$

где $t_{см}$ – величина смещения зоны рассеяния относительно нулевого значения.

При практических инженерных расчетах надежности машин коэффициент вариации используют как критерий по определению теоретического закона распределения.

При v < 0,33 имеет место нормальный закон распределения; при v > 0,33 случайные явления подчиняются закону Вейбулла (при v = 0,52 используется частный случай распределения Релея, при v = 1,0 – экспоненциальный).

Опытная информация по показателям надежности, полученная в процессе эксплуатации машин, может иметь ошибочные точки, выпадающие из общего закона распределения. Поэтому перед окончательной математической обработкой информация должна быть проверена на выпадающие точки.

Грубая проверка информации может быть проведена по правилу ±3σ. Такая проверка производится следующим образом. От полученного расчетным путем среднего значения показателя надежности $\bar{t}$ последовательно вычитают или прибавляют 3σ. Если крайние точки информации не выходят за пределы ±3σ, все точки считается действительными.

Более точная проверка, как крайних, так и любых других смежных точек информации, производится по критерию λ Ирвина. Фактическое значение критерия $\lambda_{оп}$ определяется по уравнению

$$\lambda_{on} = \frac{t_{i+1} - t_i}{\sigma}, \qquad (35)$$

где t_i +1, t_i – смежные точки информации.

В тех случаях, когда происходит выпадение точек, необходимо заново перестроить статистический ряд и пересчитать $\bar{t}$ и σ.

Основные теоретические законы распределения

Значительное количество явлений производственных процессов и операций протекает при существенном участии тех или иных случайных величин. Часто до завершения явления, процесса или операции все, что мы можем знать о случайных величинах, – это законы распределения, т.е. списки их возможных значений с указанием вероятности каждого из этих значений. Случайное число отказов может иметь определенный ряд значений, и каждое значение принимается с определенной вероятностью.

Если мы знаем вероятность всех значений, которое может принимать случайная величина, то совокупность этих вероятностей называют распределением вероятностей.

В распределении вероятностей встречаются определенные закономерности. Хотя сами события являются случайными, но оказывается, что распределение вероятностей очень часто подчиняется закономерностям, которые периодически встречаются и получили определенные названия.

Всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями, называют законом распределения случайных величин.

Типы распределения случайных величин установлены теоретически, наличие их было затем подтверждено экспериментально.

В теории надежности машин используется большое количество различных законов распределения, наиболее часто применяемых при определении показателей надежности

представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Наиболее часто используемые законы распределения

Наименование распределения	Область значений	Плотность распределения	Математическое ожидание	Дисперсия
1	2	3	4	5
Непрерывные распределения				
Равномерное	a, b	$\frac{1}{a+b}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$
Нормальное	-∞, +∞	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\ell^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}$	a	σ^2
Логарифмически нормальное	0, ∞	$\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}\ell^{-\frac{(\log x-a)^2}{2\sigma^2}}$	$\ell^{a+\frac{\sigma^2}{2}}$	$\ell^{2a+\sigma^2}\left(\ell^{\sigma^2}-1\right)$
Вейбулла	0, ∞	$acx^{\alpha-1}\ell^{-cx^2}$	$\frac{\Gamma\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)}{C^{\frac{1}{\alpha}}}$	$\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{\alpha}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{2}{\alpha}\right)}{C^{\frac{2}{\alpha}}}$

Гамма	$0, \infty$	$\frac{\beta^2}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}$	$\frac{\alpha}{\beta}$	$\frac{\alpha}{\beta^2}$

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5
Экспоненциальное	0, ∞	$\lambda e^{-\lambda x}$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
Бета	0, 1	$x^{a-1}(1-x)^{b-1}$	$\frac{a}{a+b}$	$\frac{ab}{(a+b)^2(a+b+1)}$
Стьюдента	- ∞, + ∞	$\left[2^{\frac{n-1}{2}}\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)\sqrt{2\pi}\right]^{-1}\times$ $\times\left(1+\frac{x^2}{2}\right)^{-\frac{n+1}{2}}$	0	$\frac{1}{\frac{n}{2}-2}$
Фишера	0, ∞	$\frac{\Gamma\left(\frac{n_1+n_2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_1}{2}\right)\cdot\Gamma\left(\frac{n_2}{2}\right)}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{\frac{n_1}{2}\cdot\frac{n_1}{2}-1}\times$ $\times\left(1+\frac{n_1}{n_2}x\right)^{-\frac{n_1-n_2}{2}}$	$\frac{n_2}{n_2-2}$	$\frac{2n_2^2(n_1+n_2-2)}{n_1(n_2-2)^2(n_2-4)}$
Дискретные распределения				
Биноминальное	0,1,2,… n	$P_n(m)=C_n^m p^m g^{n-m}$	np	npg

Окончание таблицы 9

1	2	3	4	5
Гипергеомет-рическое	0,1…min (M, n)	$P_m = \frac{C_n^m C_{N-M}^{n-m}}{C_M^N}$	$n\frac{M}{N}$	$\frac{M(N-M)n(N-n)}{N^2(N-1)}$
Пуассона	0,1,2…	$P_m = \frac{\lambda}{m!}\ell^{-\lambda}$	λ	λ
Геометрическое	0,1,2…	$P_m = pg^{m-1}$	$\frac{1}{p}$	$\frac{g}{p^2}$
Отрицательное биноминальное		$P_m = C_{m-1}^{r-1} p^2 g^{m-2}$	$\frac{r}{p}$	$\frac{gr}{p^2}$

Теоретический закон выражает общий характер изменения показателя надежности машин и исключает частные отклонения, связанные с недостатками первичной информации. По опытному распределению вычисляют различные показатели, которые будут характеризовать среднее значение признака, рассеяние. Затем на основе всестороннего анализа этих данных, общих теоретических предпосылок и особенностей теоретических распределений подбирают то распределение, которое ближе всего аппроксимирует опытное распределение случайной величины. Такой процесс замены опытных закономерностей теоретическими в теории вероятностей называют процессом выравнивания, или сглаживания, статистической информации. Применительно к показателям надежности с.-х. машин в

большем числе используют предельные законы нормального распределения и Вейбулла (например, частными законами Вейбулла является экспоненциальное распределение Реллея).

Закон биноминального распределения. При испытании серии последовательных независимых опытов, каждое из которых заканчивается одним из двух несовместимых между собой результатов (событие A наступает или не наступает), вероятность появления события A равна $g = 1 - p$. Так как испытания независимы, то вероятность появления или не появления события A не зависит от результатов предыдущих испытаний. При такой же схеме испытаний вероятность появления события A заданное число раз подчиняется закону биноминального распределения, который можно сформулировать так: если вероятность события A постоянна в серии последовательных независимых испытаний и равна p, то вероятность появления события A, равная k раз в n испытаниях, будет равна

$$P_n(k) = C_n^k P^k g^{n-k}. \qquad (36)$$

Это уравнение определяет собой распределение вероятностей случайного числа k, которое называется биноминальным.

В формуле символ C_n^k обозначает число сочетаний из элементов по k, т.е. биноминальный коэффициент.

Биноминальный коэффициент можно проще записать так:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \qquad (37)$$

где символ $n!$ обозначает факториал и выражает произведение натуральных чисел 1,2,3... n – при этом 0! = 1.

С учетом изложенного формула (36) примет более простой вид:

$$P_n(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k g^{n-k}. \qquad (38)$$

Математическое ожидание M_k и дисперсия σ_k^2 биноминального распределения соответственно равны

$$M_k = np;$$

$$\sigma_k^2 = npk.$$

Практическое применение распределения. Случай статистического контроля качества невосстанавливаемых изделий. При контроле партии изделий, если в ней есть доля брака, делают выборку в количестве изделий и определенного числа дефектных деталей в выборке.

Распределение Пуассона. Если вероятность p событий *А* очень мала ($p \leq 0{,}1$), число испытаний велико, то вероятность того, что событие *А* наступит k раз в испытаний, равна

$$P(n,k) = \frac{a^k}{k!} e^{-a}, \qquad (39)$$

где $a = np = M_k$ – математическое ожидание числа k.

Уравнение определяет собой распределение редких событий, или распределение Пуассона.

Когда число испытаний n велико, а p мало, то закон биноминального распределения и закон редких событий практически совпадают. Это имеет место, когда $p < 0{,}1$ и $pn < 4$. При этих условиях можно применить следующую зависимость:

$$P(nk) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k g^{n-k} = \frac{a^k}{k!} e^{-a}. \qquad (40)$$

Поскольку $a = np$, зависимость примет вид

$$P(nk) = \frac{(np)^k}{k!} e^{-np}. \qquad (41)$$

Распределение Пуассона имеет только одни параметр:

$$a = np = M_k.$$

Для этого распределения дисперсия численно равна

математическому ожиданию:

$$\sigma_k^2 = M_k .$$

Коэффициент вариации:

$$\nu(k) = \frac{1}{\sqrt{a}} .$$

Поэтому, когда в распределении дискретной случайной величины $\bar{t}$ и σ^2 мало отличаются друг от друга по своим численным значениям, то можно с уверенностью считать, что данное распределение подчиняется закону редких событий.

Нормальный закон распределения. Нормальное распределение занимает особое место в теории вероятностей и в теории надежности машин.

Нормальным называется распределение вероятности непрерывной случайной величины, которая может принимать как отрицательные, так и положительные значения во всем диапазоне возможных значений – от минус бесконечности до плюс бесконечности.

Главной особенностью нормального закона является то, что это предельный закон, к которому стремятся остальные законы распределения при определенных условиях. Нормальный закон можно использовать и тогда, когда известен истинный закон распределения, но приближенное представление через нормальный закон удобно для работы. Оказывается, что в ряде случаев вместо биноминального распределения можно пользоваться нормальным. Другая область применения нормального распределения в теории надежности заключается в замене распределения Пуассона.

Практика показывает, что, используя нормальный закон, можно описать такие случайные величины, как случайная ошибка при измерениях, отклонения размеров деталей, изменение зазоров в подшипниках, обусловленное износом, зазоров в сопряжениях главной передачи автомобиля и т.п.

Теоретическим обоснованием нормального распределения является центральная предельная теорема,

смысл которой состоит в том, что для случайной величины, представляющей собой общий результат большого числа независимых «небольших» воздействий, можно ожидать, что закон распределения будет тем ближе к нормальному, чем больше число наблюдений. Этот результат справедлив независимо от того, по какому закону распределены из случайные величины, средняя из которых рассматривается.

Плотность распределения при нормальном законе представлена следующей формулой:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}}, \qquad (42)$$

где t – параметр надежности (является случайной величиной); $\bar{t}$ среднее значение, или математическое ожидание, случайной величины; σ – среднеквадратическое отклонение; π – постоянное число (3,14); e – основание натуральных логарифмов (e = 2,71828).

Из плотности распределения видно, что распределенная по нормальному закону случайная величина (отказ) может изменяться в интервале (-∞, +∞). Встречающиеся на практике случайные величины обычно изменяются в каких-либо конечных интервалах. Это обстоятельство не мешает использовать нормальный закон для описания таких величин.

Постоянные $\bar{t}$ и σ плотности распределения называются параметрами нормального закона и однозначно определяют его. График плотности распределения нормального закона показан на рисунке 4. Он симметричен относительно вертикали, отстоящей от начала координат на расстоянии $\bar{t}$, имеет максимум в точке $\bar{t} = \sigma$, который равен $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, и перегибы в точках. Из уравнения ясно, что $f(t)$ принимает наибольшие значения тогда, когда t равняется $\bar{t}$, потому, что при t, равном $\bar{t}$, показатель степени обращается в нуль.

Из симметрии [симметрия имеет место потому, что в

формулу входит квадрат $(t-\bar{t})^2$] ясно, что среднее значение случайного отказа t равно $\bar{t}$.

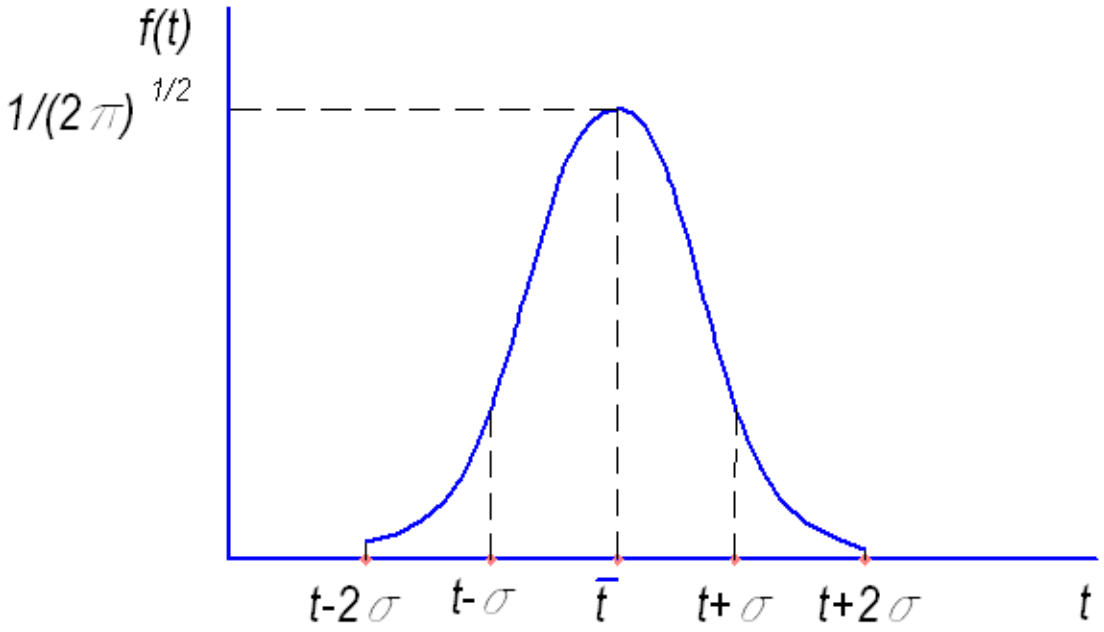


Рисунок 4 – Плотность распределения нормального закона

Одной из задач, часто решаемых с помощью этого закона распределения, является определение вероятности попадания случайной величины $\bar{t}$ в данный интервал $(t_1,\ t_2)$. Эта вероятность выразится формулой

$$P(t_1 < \bar{t} < t_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} dt \quad . \qquad (43)$$

Определенный интервал в правой части нельзя вычислить точно, так как соответствующий неопределенный интервал не выражается конечным числом элементарных функций. Для приближенного вычисления интервала приходится предварительно разлагать подынтегральную функцию в ряд. Делать это в каждом конкретном случае, т.е. при каждой паре значений t и σ, очень неудобно. Эту трудность можно преодолеть, если перейти к нормированному нормальному закону. Рассмотрим сначала частный случай, когда $\bar{t}$ = 0 , а σ = 1. Для этого случая плотность вероятности будет обозначаться

через $f_0(t)$.

В этом случае уравнение (42) запишется так:

$$f_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}. \qquad (44)$$

Эта функция одной переменной легко табулируется, и для нее есть дробные таблицы. Центральная функция табулирована в долях σ.

При помощи таблиц для $f_0(t)$ легко вычислить плотность распределения и для тех случаев, когда $\bar{t}$ не равно 0 и σ не равно 1.

Из уравнения (44) имеем

$$f(t_c) = \frac{A}{\sigma} f_0\left(\frac{t_c - \bar{t}}{\sigma}\right), \qquad (45)$$

где A – величина интервала статистического ряда; t_c – середина интервала.

Функция распределения $F(t)$ определяется интегрированием функции плотности вероятности $f(t)$:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} dt. \qquad (46)$$

Центрированная и нормированная интегральная функция (σ = 1, $\bar{t}$ = 0) определяется по уравнению

$$F_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} dt. \qquad (47)$$

Для этой функции есть таблицы. Функция с одним входом, так что, имея таблицу, легко вычислять функцию распределения для общего случая.

Из этих уравнений получим

$$F(t_k) = F_0\left(\frac{t_k - \bar{t}}{\sigma}\right), \qquad (48)$$

где t_k – значение конца интервала статистического ряда.

Для практики расчетов важно знать, как искать функцию $F_0(t)$ для отрицательных значений t. Для этого существует очень простое правило:

$$F_0(-t) = 1 - F_0(t). \qquad (49)$$

Наработка на отказ не может быть отрицательной, поэтому приведенные выражения справедливы только при достаточно малых средних и квадратных отклонениях, когда коэффициент вариации меньше 0,33.

Это следует из особенностей случайных величин, имеющих нормальное распределение – 68,3% значений случайной величины заключено в интервале $m_x \pm \sigma$, 95% – в интервале $m_x \pm 2\sigma$, 99,7% – в интервале $m_x \pm 3\sigma$.

Отсюда возникает «правило трех σ»: практически все значения случайной величины лежат в интервале ± 3σ.

Действительно, шансы на то, что выбранная случайным образом нормально распределенная случайная величина окажется в интервале, составляют 997 к 1000.

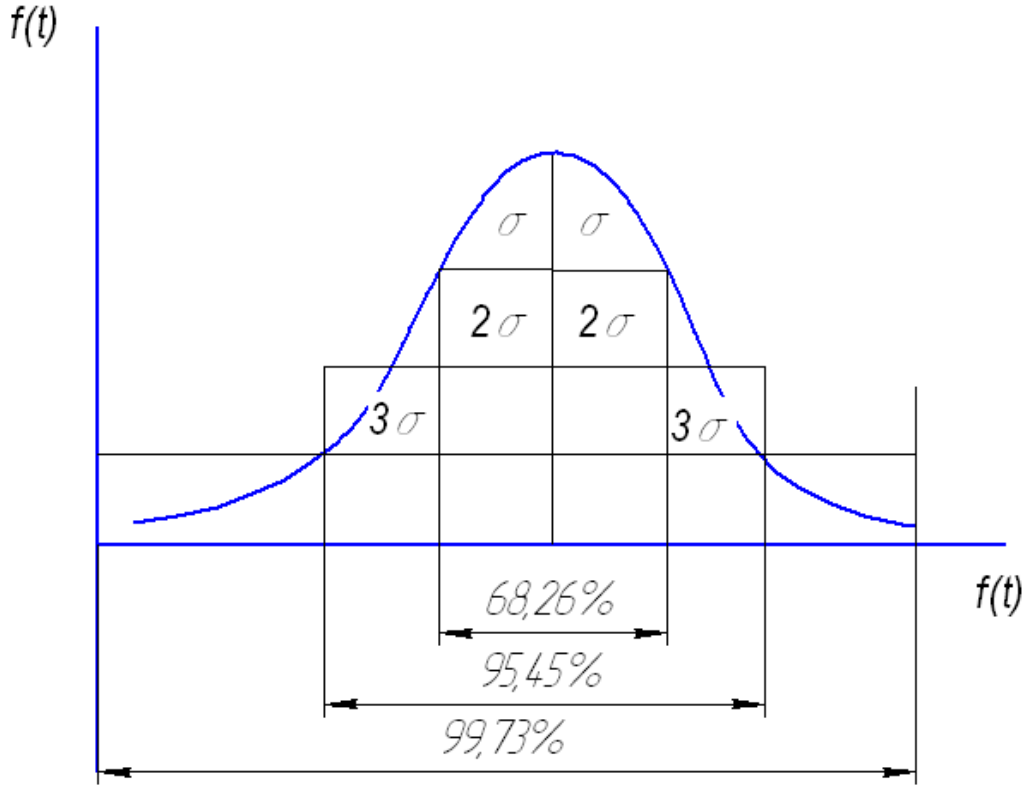


Рисунок 5 – Плотность нормального распределения

На рисунке 6 показана кривая распределения нормального закона для различных значений $\bar{t}$ и σ.

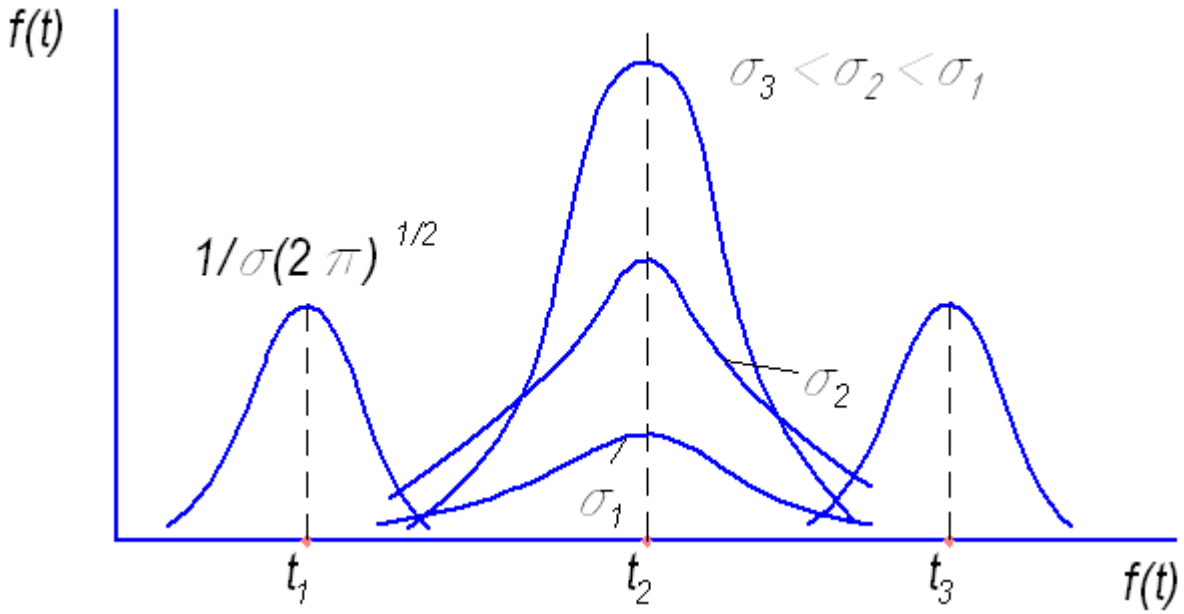


Рисунок 6 – Влияние параметров $\bar{t}$ и σ нормального закона на форму кривой распределения

Изменение параметра $\bar{t}$ приводит только к перемещению кривой распределения, не изменяя ее формы, поэтому данный параметр называется также центром распределения.

При изменении параметра σ форма кривой распределения также не изменяется, но изменяется ее масштаб по обеим координатным осям.

С уменьшением значения этого параметра увеличивается доля значений случайной величины t, сосредоточенных в окрестностях точки $\sigma = t = \sigma$, т.е. в окрестности t.

Несмотря на различную форму, кривые распределения имеют общие черты:

1. Все кривые имеют одну наивысшую точку, ордината которой равна $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, что соответствует $t = \bar{t}$; по мере удаления от точки плотность распределения падает.

2. При $t \to \infty$ ветви кривой асимптотически приближаются к оси абсцисс.

3. При увеличении σ максимальная ордината уменьшается, т.е. кривая становится более пологой, при уменьшении кривая распределения вытягивается вверх, одновременно сжимаясь с боков, становится иглообразной.

4. Все кривые симметричны относительно своей максимальной ординаты $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, это показывает, что значения, равноудаленные от наивероятного значения (максимальной ординаты), имеют одинаковые вероятности.

5. Вся площадь, расположенная под кривой, равна единице.

Отличие кривых распределения заключается в том, что суммарная площадь различным образом распределена между разными участками.

Закон нормального распределения используется при определении характеристик рассеяния межремонтных ресурсов, наработки на ресурсный отказ, ошибок измерения и размеров деталей, сложения, нескольких одинаковых или разных законов распределения. Обработка сотен различных случайных величин, связанных с эксплуатацией с.-х. машин, показала, что примерно в 40% случаев может быть принят нормальный закон распределения.

Экспоненциальное распределение предполагает, что отказы машин происходят независимо друг от друга с постоянной интенсивностью. Поэтому оно применяется в основном для описания внезапных отказов.

В эксплуатации машин возможно найти периоды, для которых справедливо экспоненциальное распределение. Например, распределение безотказной работы двигателя за весь срок существенно отличается от экспоненциального, но если двигатель устанавливается после приработки и заменяется к моменту начала износовых отказов другими, тоже прошедшими приработку, часто распределение его отказов можно считать экспоненциальным. Можно показать, что экспоненциальное распределение «в пределе» является статистической моделью времени безотказной работы системы с большим числом последовательно соединенных элементов. При этом распределение времени безотказной работы отдельных элементов может быть экспоненциальным. Важно только, чтобы каждый элемент в отдельности не оказывал очень большого влияния на вероятность выхода из строя всей системы. Поэтому экспоненциальное распределение часто успешно описывает распределение времени безотказной работы систем, в которых каждый неисправный элемент

заменяется исправным.

Плотность распределения имеет вид

$$f(t)=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda t}=\lambda\exp(-\lambda x); x\geq 0;\lambda>0\\ 0 \text{ в остальных случаях}\end{cases}. \quad (50)$$

Экспоненциальное распределение является однопараметричным, т.е. зависит от одного параметра.

Интегральная функция распределения определяется по уравнению

$$F(t)=\int_0^x \lambda e^{-\lambda x}dx=1-\lambda^{-\lambda x}. \quad (51)$$

Функция безотказной работы машин:

$$P(t)=1-F(\lambda)=e^{-\lambda x}. \quad (52)$$

Находим интенсивность отказов с помощью зависимостей:

$$\lambda(x)=\frac{f(x)}{P(x)};$$

$$\lambda(x)=\frac{\lambda e^{-\lambda x}}{f(x)-\int_0^x \lambda e^{-\lambda x}dt}=\frac{\lambda e^{-\lambda x}}{e^{-\lambda x}}=\lambda=const. \quad (53)$$

Таким образом, параметр λ – это интенсивность отказов. То, что она постоянна, означает, что вероятность отказа элемента предполагается не зависящей от его предыстории, от того, работал ли он уже 100 или 1000 часов.

Обработка различных случайных величин, связанных с эксплуатацией техники, показала, что экспоненциальным законом описывается наработка между отказами для невосстанавливаемых изделий. У восстанавливаемых изделий случайным является промежуток времени между последовательными отказами. Следовательно, если изделие работает в установленном режиме, то случайные промежутки времени между отказами подчиняются экспоненциальному закону распределения.

Закон распределения Релея. При распределении моментов возникновения отказов имеет место закон Релея. Этот закон однопараметрический, и дифференциальная функция распределения его имеет выражение

$$f(t) = \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{\sigma^2}}, \qquad (54)$$

где t – показатель надежности машин; σ – среднее квадратическое отклонение.

Зависимость между основными количественными характеристиками надежности при распределении по закону Релея имеет вид:

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = e^{-\frac{t^2}{\sigma^2}}; \qquad (55)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{t}{\sigma^2}; \qquad (56)$$

$$T_{cp} = \int_0^\infty P(t)dt = \int_0^\infty e^{-\frac{t^2}{\sigma^2}} dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma. \qquad (57)$$

Из равенства

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{t}{\sigma^2} \qquad (58)$$

видно, что интенсивность отказов растет линейно.

При распределении моментов возникновения отказов по закону Релея происходит интенсивное старение машин, т.е. закон распределения характеризует долговечность элементов с выраженным эффектом старения.

Дисперсия и среднее квадратическое отклонение выражаются следующими зависимостями:

$$D(t) = \int_0^t \left(t - \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma\right)^2 \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma^2; \qquad (59)$$

$$\sigma(\quad) = \sqrt{D(\quad)} = \sqrt{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma^2} = \sigma\sqrt{2 - \frac{\pi}{2}}\,. \qquad (60)$$

Закон распределения Вейбулла. Распределение Вейбулла широко используют в теории надежности для описания времени безотказной работы машин.

Это распределение непрерывной случайной величины t, которая может принимать только положительное значение ($t \geq 0$). Область изменения случайной величины t лежит в интервале (0; +∞) или в интервале (*C1*; +∞).

Плотность распределения закона Вейбулла имеет вид

$$f(\quad) = \frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \qquad (61)$$

где t – случайная величина; a, b – параметры распределения.

Отличительной особенностью закона Вейбулла является правосторонняя асимметрия дифференциальной функции. Вследствие асимметрии, в отличие от нормального закона, среднее, модальное и медианное значения показателя надежности закона распределения Вейбулла не равны между собой.

Интегральная функция закона распределения Вейбулла определяется зависимостью

$$F(\quad) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}. \qquad (62)$$

Интегральная функция $F(t)$ связана с безотказностью $P(t)$ уравнением

$$P(\quad) = 1 - F(\quad). \qquad (63)$$

Отсюда, с учетом

$$F(\quad) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \qquad (64)$$

получим

$$P(\quad) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}. \qquad (65)$$

Чтобы пользоваться законом распределения Вейбулла при оценке показателей надежности, необходимо определить параметры a и b на основании опытной информации.

Существует несколько методов определения параметров a и b максимального правдоподобия, моментов, квантилей и т.п.

Наиболее точным является метод максимального правдоподобия, при котором параметр b определяется из уравнения

$$\frac{N}{b} + \sum_{i=1}^{N} \ln t_1 = \frac{N \sum_{i=1}^{N} t_i^b \ln t_i}{\sum_{i=1}^{N} t_i^b}. \qquad (66)$$

Определить параметр b можно последовательным подбором различных значений b в диапазоне от 1,0 до 3,5, добиваясь равенства уравнения, что проще и быстрее сделать графическим методом, заменив левую часть уравнения *У1*, правую *У2* и подставляя в них четыре значения в диапазоне 1,0…3,5. Затем строится график: по оси абсцисс откладываются значения b, по оси ординат – значения *У1* и *У2* в масштабе. По полученным точкам строятся кривые, абсцисса точки пересечения этих кривых и является параметром.

По известной величине b параметр a определится из уравнения

$$a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} t_i^b}{N}}. \qquad (67)$$

Более простым и достаточно точным методом определения параметров Вейбулла является метод моментов (по известной величине коэффициента вариации ν).

Распределение Вейбулла является достаточно универсальным, охватывающим разнообразные случаи изменения вероятности отказов, в частности:

1. При $b < 1$ плотность распределения имеет вид убывающей функции, а интенсивность отказов убывает с наработкой.

2. При b = 1 распределение Вейбулла совпадает с экспоненциальным, а интенсивность отказов постоянна.

3. При b > 1 плотность распределения одновершинная, а интенсивность отказов возрастает с течением времени.

4. При b = 2 интенсивность отказов является линейной функцией, (этот частный случай распределения Вейбулла совпадает с распределением Релея).

5. При b = 3,3 распределение Вейбулла весьма близко к нормальному закону распределения.

Закон распределения Вейбулла применительно к показателям надежности применяется при определении характеристик рассеивания ресурсов и сроков службы деталей машин, определении отказов, оценки вероятности безотказной работы машин. Этот закон описывает распределение ресурса различных деталей с.-х. машин – контактов прерывателя, шарниров карданной передачи, рулевого управления, полуосей, износа подшипников и т.д.

Критерии согласия опытных и теоретических распределений показателей надежности

Выбор теоретического закона распределения показателя надежности производится, как было сказано выше, в соответствии с областью применения и с учетом величины коэффициента вариации.

Совмещение в одном масштабе опытной и теоретической дифференциальных кривых (полигон распределения и кривая плотности вероятности) позволяет визуально судить о степени их совпадения, или согласия.

Однако в некоторых случаях нужны более точные и объективные методы оценки совпадения опытных и теоретических данных по так называемым критериям согласия. Это особенно необходимо тогда, когда коэффициент вариации близок к 0,33 и трудно определить закон распределения: то ли отдать предпочтение нормальному закону, то ли закону Вейбулла. В таких случаях выбор закона распределения производится по критерию согласия.

Физический смысл проверки согласия заключается в определении степени расхождения опытной и теоретической

вероятностей. При этом в качестве меры совпадения или расхождения могут быть выбраны различные критерии согласия: сумма квадратов отклонения теоретических вероятностей от опытных, наибольшее или суммарное отклонение кривой накопленных опытных вероятностей от интегральной кривой теоретического закона распределения и т.д.

Критерий согласия является случайной величиной и подчиняется определенному закону распределения. Поэтому по величине критерия согласия можно определить вероятность совпадения опытных и теоретических функций и принять теоретический закон показателя надежности.

В теории вероятности известно несколько критериев согласия. Применительно к показателям надежности тракторов и с.-х. машин чаще используются критерии Пирсона χ^2 и Колмогорова λ. Критерий χ^2 Пирсона определяется как сумма квадратов отклонения опытных и теоретических частот в каждом интервале статистического ряда:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(m_{oni} - m_{Ti} \right)^2}{m_{Tc}}, \qquad (68)$$

где n – число интервалов статистического ряда; m_{oni} – опытная частота (количество случаев) в i-м интервале статистического ряда; m_{Ti} – теоретическая частота в i-м интервале.

$$m_{Ti} = N\left[F\left(t_{i+1} \right) - F\left(t_{i} \right) \right], \qquad (69)$$

где N – общее количество испытываемых машин или повторность информации.

Для определения критерия согласия χ^2 строится укрупненный статистический ряд информации при условии $mi \geq 5$ и $n \geq 4$.

При построении его допускается объединение тех интервалов, в которых число случаев $m_{Ti} < 5$.

Для уменьшения арифметических вычислений не

рекомендуется увеличивать число интервалов n более 7.

Судя по значениям критериев согласия, делают вывод и принимают более приемлемый закон распределения.

Критерий согласия χ^2 можно определить по таблице. Для входа в таблицу нужно определить число степеней свободы

$$r = n - k, \tag{70}$$

где n – число интервалов укрупненного статистического ряда; k – число обязательных связей.

Для нормального закона и закона Вейбулла число обязательных связей равно трем: две связи – два параметра распределения, и третья связь –

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = 1. \tag{71}$$

Критической вероятностью совпадения принято считать P = 0,1. В случае, если P < 0,1, выбранный закон считается недействительным.

Проще оценку совпадения проводить по критерию Колмогорова. В этом случае в качестве меры совпадения выбрана наибольшая разность $Б_{\max}$ между статистической и теоретической интегральными функциями распределения:

$$Б_{\max} = \sum_{i=1}^{n} P_i - F(_), \tag{72}$$

где $\sum_{i=1}^{n} P_i(_)$ и $F(_)$ – соответственно сумма накопленных вероятностей и интегральная функция теоретического закона распределения при таком значении показателя надежности t, при котором $Б_{\max}$ = max. Для учета повторности информации Колмогоров определяет критерий согласия λ по уравнению

$$\lambda = Б_{\max} \sqrt{N}, \tag{73}$$

где N – общее количество информации.

Вероятность совпадения опытных и теоретических данных определяется законом распределения критерия согласия λ.

Таблица 10 – Распределение критерия согласия Колмогорова

0,0	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	l,2	1,3
1,0	0,96	0,71	0,54	0,39	0,27	0,18	0,11	0,07

Критерий согласия Колмогорова следует применять только в тех случаях, когда известен заранее не только теоретический закон распределения, но и значения его параметров.

Этот критерий, как правило, дает завышенную вероятность совпадения, поэтому для оценки теоретических и опытных значений показателей надежности следует использовать критерий Пирсона.

Доверительные границы рассеивания значений показателя надежности

В результате испытания группы машин и обработки собранной информации определяют количественные характеристики показателя надежности $\bar{t}$, σ, v.

В дальнейшем эти характеристики должны быть перенесены на другие группы машин, работающих в других условиях. Естественно, изменение количества машин в группе и условий их эксплуатации вызовет количественное изменение характеристик показателя надежности.

Хотя эти изменения носят случайный характер, они происходят в определенных границах или интервале, величина которых зависит от многих факторов. Определение границ рассеивания характеристик показателей надежности является важной задачей теории надежности.

Если проведено наблюдение за N машинами, то $\bar{t}$ (одиночное значение) отличается от $\bar{t}$ в крайних случаях на величину $\pm 3\sigma$ для закона нормального распределения и на величину от 0,1 до 2,5 a – для закона Вейбулла.

Для нормального распределения площадь под дифференциальной кривой, или площадь охвата α, ограниченная протяженностью от абсцисс $\pm 3\sigma$, составляет 0,997, или 99,7%.

Следовательно, при таких случаях рассеивания в 997

случаях из 1000 значения одиночного показателя надежности будет находиться в интервале значений $\bar{t}$-3σ до $\bar{t}$+3σ.

Такая высокая степень доверия расчета, охватывающая 99,7% в их возможных вариантах, является излишней при определении показателя надежности тракторов, с.-х. машин и их элементов.

Площадь охвата и соответствующий интервал рассеивания табулированы.

При прочих равных условиях выбранная заранее площадь охвата α характеризует степень доверия расчета и гарантирует вероятность попадания показателя надежности в соответствующий интервал его значений.

Поэтому она называется доверительной вероятностью α.

Интервал, в который при заданной доверительной вероятности α попадают 100% от N, называют доверительным интервалом $J\alpha$.

Границы, в которых может колебаться значение одиночного показателя надежности при заданной α, называют нижней доверительной границей $t_{\alpha}^{н}$ и верхней доверительной границей $t_{\alpha}^{в}$.

Взаимосвязь между доверительной вероятностью α, величинами доверительных границ и возможной наибольшей ошибкой l_{a} для НЗР определяется формулой

$$l_{\alpha} = t_{\alpha}\sigma, \qquad (74)$$

где t_{α} – коэффициент табулирования при N > 25.

В соответствии с рисунком 7 можно вывести расчетные уравнения для определения доверительного интервала, доверительных границ, абсолютной ошибки для одиночного показателя надежности при законе нормального распределения:

$$l_{\alpha} = t_{\alpha}\sigma; \qquad (75)$$

$$t_{\alpha}^{н} = \bar{t} - t_{\alpha}\sigma; \qquad (76)$$

$$t_{\alpha}^{в} = \bar{t} + t_{\alpha}\sigma; \quad (77)$$

$$J_{\alpha} = t_{\alpha}^{в} - t_{\alpha}^{н}. \quad (78)$$

Анализ расчетных уравнений позволяет заметить, что увеличение доверительной вероятности или степени доверия расчета вызывает увеличение возможной ошибки l_{α} и расширение доверительного интервала.

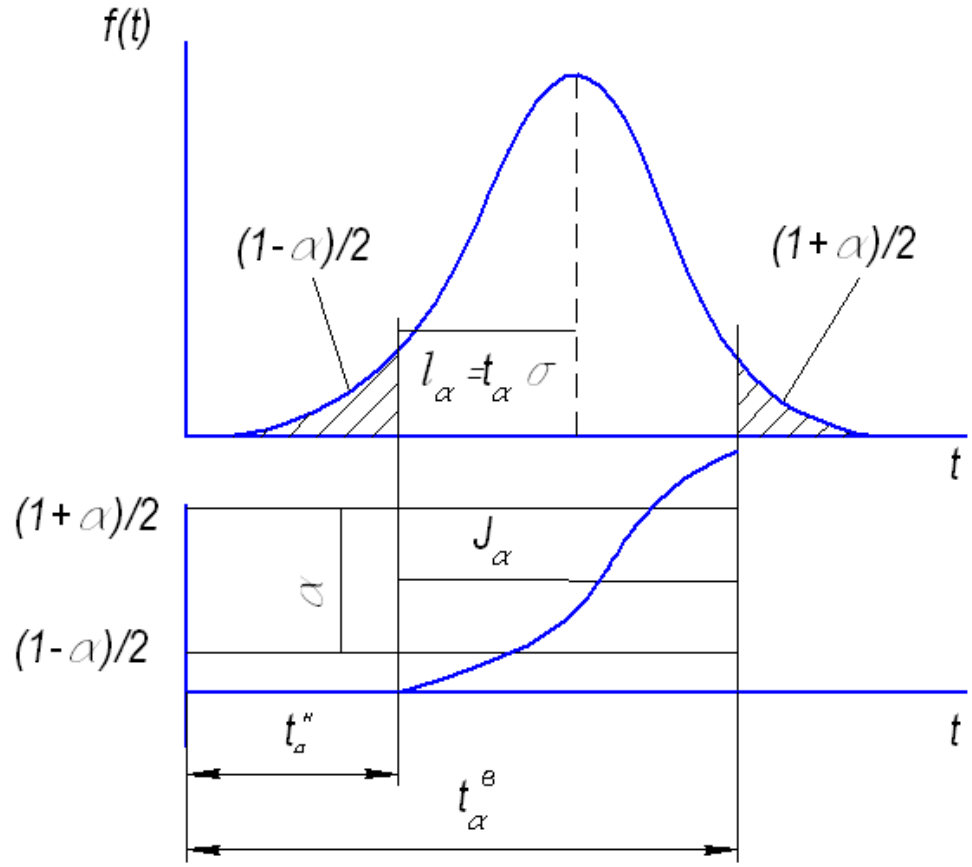


Рисунок 7 – Доверительная вероятность α и доверительные границы для закона нормального распределения

При расчете доверительных границ рассеивания показателей надежности рекомендуется применять следующие значения доверительных вероятностей: α = 0,80; 0,90; 0,95; 0,99.

В случае закона распределения Вейбулла доверительные границы рассеивания одиночного показателя надежности определяют по такой же схеме, однако, вследствие асимметрии дифференциальной функции, доверительные границы рассеивания одиночного показателя надежности при ЗРВ определяют по следующим уравнениям:

$$t_{\alpha}^{н} = H_{k}^{в}\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\sigma + t_{см}; \qquad (79)$$

$$t_{\alpha}^{в} = H_{k}^{в}\left(\frac{1+\alpha}{2}\right)\sigma + t_{см}, \qquad (80)$$

где $H_{k}^{в}$ – квантиль ЗРВ, значение которого находят по таблице (вход в таблицу по параметру b и величинам $\frac{1-\alpha}{2}$ и $\frac{1+\alpha}{2}$).

Абсолютная и относительная предельные ошибки переноса характеристик показателя надежности

Числовые значения характеристик показателя надежности изменяются в зависимости от количества наблюдаемых машин N и условий их эксплуатации. Оценивают эти изменения доверительными границами, или доверительным интервалом.

При расчетах характеристик и переносе их на другие группы машин необходимо оценивать наибольшую возможную ошибку такого переноса.

Из рисунка 7 видно, что наибольшая ошибка будет по величине l_α по обе стороны от среднего значения показателя надежности. Для удобства расчета относительную предельную ошибку σ определяют в процентах от среднего значения показателя надежности $\bar{t}$ независимо от закона распределения:

Наибольшая ошибка l_α уменьшается, а доверительные границы сближаются с увеличением количества испытываемых машин.

Абсолютная ошибка:

$$l_\alpha = t_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad (81)$$

нижняя доверительная граница:

$$\bar{t}^{н}_{\alpha} = \bar{t} - t_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad (82)$$

верхняя доверительная граница:

$$\bar{t}^{в}_{\alpha} = \bar{t} + t_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad (83)$$

доверительный интервал:

$$J_\alpha = \bar{t}^{н}_{\alpha} - \bar{t}^{в}_{\alpha}. \quad (84)$$

При испытании с.-х. машин доверительный интервал J_α = 0,80-0,95, а величина относительной ошибки 10-25%. Количество машин при испытании, или повторность информации, рассчитывают в соответствии с принятым законом распределения показателя надежности.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

Цели и задачи изучения раздела

Улучшение использования с.-х. машин во многом связано с повышением эффективности ремонтно-обслуживающей базы. Бурный рост технической вооруженности с одновременным усложнением машин требует обеспечения высокоэффективного использования и создания базы для ТО и ремонта с целью обеспечения надежной и долговечной работы техники.

Использование машин связано с их старением, постепенным ухудшением эксплуатационных свойств, изменением экономических показателей.

С ростом машиновооруженности возрастает объем ремонтно-профилактических работ, меняются их техническое содержание и производственно-экономическая значимость. Поэтому ТО и ремонт машин не временные мероприятия, а объективно необходимые технические и экономические воздействия людей на средства производства.

В своем развитии ремонтное производство претерпело ряд организационных преобразований. Появилась новая отрасль народного хозяйства – ремонтное производство, способствующее выполнению полевых работ в агротехнические сроки.

Одновременно с ростом ремонтного производства создавалась и наука о надежности и ремонте машин, изучающая причины снижения долговечности машин, разрабатывающая методы поддержания их в работоспособном состоянии, технологии и организации восстановления их ресурса.

Теория и практика ТО и ремонта машин основана главным образом на научных положениях, разработках и изобретениях отечественных ученых и инженерно-технических работников. Основой этой науки является теория трения, смазки и изнашивания. Еще М.В. Ломоносов в 1752 г. построил машины для испытания на износ и проводил эти испытания.

В области теории трения и изнашивания многое сделано А.К. Зайцевым, В.Д. Кузнецовым, М.М. Хрущовым, Д.В.

Конвисаровым, Б.И. Костецким, И.В. Крагельским.

Основоположниками гидродинамической теории трения и смазки являются академик С.А. Чаплыгин, профессора Н.П. Петров, Н.В. Жуковский, Н.И. Мерцалов, Е.М. Гутбар и другие, труды которых стали теоретической основой ряда исследований по износу и ремонту тракторов и других машин.

Вопросы теории и практики в области восстановительных процессов были разработаны отечественными учеными и изобретателями: инженерами Н.Г. Славяновым и Н.Н. Бернардосом – электродуговая сварка, академиком Б.С. Якоби – гальваностегия, академиком Е.О. Патоном – механизированные способы, профессором О.С. Аскинази – электромеханический способ восстановления и упрочнения изношенных поверхностей деталей машин, инженером Г.П. Кленовкиным и профессором И.Е. Ульманом – вибродуговой способ наплавки, профессорами В.П. Вологдиным, Б.Р. Лазаренко и В.П. Гусевым – электрическая обработка деталей и др.

В области организации технологии ремонта машин большая работа проведена В.И. Казарцевым, В.В. Ефремовым, А.И. Селивановым, И.С. Левитским, Ю.Н. Петровым, И.Е. Ульманом, В.П. Сусловым, С.С. Черепановым, М.Я. Рассказовым, Н.Ф. Тельновым и др.. В их исследованиях рассмотрены необходимость и роль ремонтного производства в поддержании с.-х. машин в работоспособном состоянии.

Проведенные исследования позволили теоретически обосновать и решить ряд сложных проблем в области технологии и организации ремонтного производства, наметить пути их дальнейшего развития и совершенствования, разработать новые технологические процессы ремонта и восстановления деталей и т.д.

В настоящее время происходит качественное изменение с.-х. машин. Усложнение машин приводит к повышению требований к их надежности. Особенно важное значение приобретает надежность для техники, оснащенной сложными системами и изделиями, включающими до $5 \cdot 10^5$ компонентов, часто работающих в условиях высоких скоростей, температур, механических или электрических напряжений.

Надежность современных машин несоизмеримо выше, чем у тех, которые выпускались полвека назад. Так, если трактор требовал подтяжки шатунных подшипников через 50-70 моточасов, то у современных тракторов подобное вмешательство требуется только 5-6 тыс. моточасов. И, тем не менее, надежность с.-х. машин, с точки зрения требований сегодняшнего дня, нельзя признать достаточной по основным ее показателям: средний доремонтный ресурс тракторов пока не превышает 5-6 тыс. моточасов, вероятность безотказной работы большинства сложных машин не превышает 0,7-0,8, коэффициент технической готовности уборочных машин составляет 0,7-0,75.

Появление науки о надежности машин было обусловлено следующими основными причинами:

1. Усложнением машин и их функций; на смену простейшим машинам пришли сложные, с высоким уровнем автоматизации, машины-автоматы, целые механические системы.

2. Непрерывным форсированием машин по передаваемым мощностям, частоте вращения, скоростям движения рабочих органов; наряду с этим уменьшением удельного веса и объема (на единицу мощности) элементов машин. Эти тенденции наглядно прослеживаются в развитии автомобильной техники. Так, параметры, характеризующие форсирование двигателей легковых автомобилей, увеличиваются, а удельный вес двигателей снижается. Подобный процесс предопределяет возрастание механической, тепловой, электрической и других видов напряженностей машин и их узлов. Чтобы сохранить в этих условиях уровень надежности машин, приходится предпринимать все новые и новые меры.

3. Значительно возросшими требованиями к надежности машин, особенно в эпоху научно-технической революции. Новейшая техника все убедительнее подтверждает известное правило: чем сложнее машина, тем выше вероятность ее отказа.

Причины нарушения работоспособности и снижения надежности машин

Нарушение работоспособности и снижение надежности

машин возникают из-за отказов и неисправностей, вызываемых разными факторами конструктивного, технологического, производственного и ремонтного характера. Воздействия этих факторов на техническое состояние машин взаимосвязаны. Те изменения, которые происходят с течением времени в любой машине и приводят к потере ее работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями, которым она подвергается. В процессе эксплуатации на машину воздействуют все виды энергии, что может привести к изменению параметров отдельных элементов, механизмов и машины в целом.

При работе машины наблюдаются следующие виды энергии.

Механическая энергия не только передается по всем звеньям механизмов машины в процессе работы, но и воздействует на детали в виде статических, циклических или динамических нагрузок от взаимодействия с внешней средой. Механическая энергия в деталях машин может возникнуть и как следствие тех затрат энергии, которые имели место при изготовлении деталей и сохранились в них в потенциальной форме. Например, деформация деталей при перераспределении внутренних напряжений, изменение объема детали после ее термической обработки (внутренние напряжения в отливке, после сварочных работ, монтажные напряжения).

Тепловая энергия воздействует на машину и ее детали при колебаниях температуры окружающей среды, при осуществлении рабочего процесса, при работе приводных механизмов, электротехнических и гидравлических устройств.

Химическая энергия оказывает значительное влияние на работу машин; химические воздействия вызывают процессы, приводящие к разрушению отдельных элементов машин (например, оборудование животноводческих ферм).

Биологические повреждения машин, вызываемые живыми организмами, разрушение материалов ухудшение их технологических характеристик живыми организмами.

Электромагнитная энергия в виде радиоволн пронизывает все пространство вокруг машины и может оказывать влияние на работу электронной аппаратуры.

Ядерная (атомная) энергия, выделяющаяся в процессе

превращения атомных ядер, может воздействовать на материалы, вызывая изменение их свойств.

Таким образом, все виды энергии воздействуют на машину и вызывают в ней целый ряд нежелательных процессов, создают условия для ухудшения ее технологических характеристик.

Об исправной работе машины обычно судят по ее характеристикам. Например, для двигателя рабочими характеристиками служат изменение мощности в зависимости от числа оборотов, т.е. $\mathrm{N}e = f(n)$, удельные расходы топлива и смазки, отсутствие стуков и ненормальных шумов. Для передаточных механизмов основной характеристикой является механический коэффициент полезного действия, о падении которого во время работы судят обычно по возрастающему шуму в передачах. Для рабочих органов с.-х. машин и орудий главнейшим показателем является качество выполняемой работы. Всякое отклонение указанных характеристик свидетельствует о возникновении той или иной неисправности в машине.

Машина состоит из отдельных сопряжений, и поэтому изменение рабочей характеристики машины происходит вследствие изменений в ее сопряжениях. Об исправной работе сопряжений судят же по рабочим характеристикам. В данном случае этим показателем является характер соединения деталей, т.е. посадка. Для сопряжения неисправность проявляется в нарушении посадки, т.е. в нарушении зазоров в подвижных сопряжениях и натягов в неподвижных. Так, падение мощности двигателя может быть результатом увеличения зазоров в деталях ЦПГ.

На рисунке 8 представлена кривая нарастания износа пары работающих деталей. Эта кривая справедлива для большинства подвижных сопряжений, работающих в установившемся режиме.

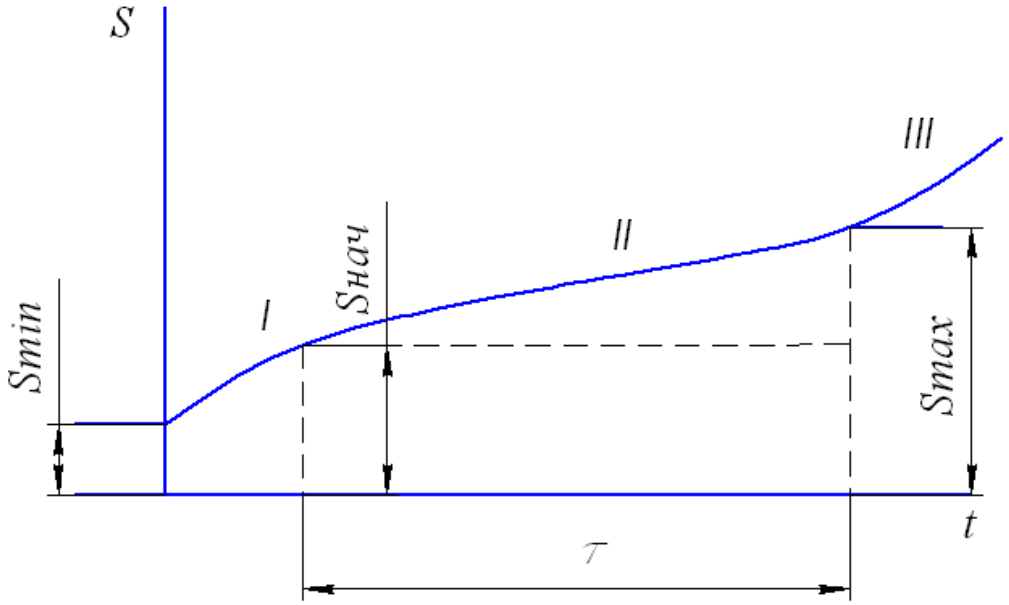


Рисунок 8 – Кривая износа сопряжения

Кривая имеет три явно выраженных участка: *I* – характеризующий процесс приработка сопряжений; *II* – участок нормальной работы сопряжения; *III* – участок, соответствующий периоду разрушения сопряжения вследствие износа его сверх допустимого предела.

Естественный износ механизмов растет вместе с увеличением времени работы этих механизмов. Однако постепенное количественное нарастание износа лишь до известного предела не влечет за собой качественных изменений в работе механизма и лишь до этого предела износ может считаться естественным, нормальным. Переходя же указанный предел, износ приводит к качественным изменениям в работе механизма, резко ухудшая его работу.

Межремонтный срок службы сопряжения может быть выражен следующим уравнением:

$$\tau = \frac{S_{\max} - S_{нач}}{tg_{\alpha}}, \qquad (85)$$

где τ – межремонтный срок службы сопряжения; $S_{\max}$ – предельно допустимое ослабление посадки при износе; $S_{нач}$ – величина, характеризующая начальную свободу посадки приработанного сопряжения; tg_{α} – величина, характеризующая

интенсивность нарастания износа сопряжения.

Следовательно, всякое нарушение посадки обусловлено изменениями деталей машин в размерах и форме. Наибольшее число факторов, влияющих на надежность машин, обусловлено причинами естественного изнашивания деталей, т.е. физико-химическими процессами. Это влечет изменение параметров изделия и может привести к отказу, что можно выразить в виде схемы (рисунок 9).

Рисунок 9 – Процесс возникновения отказа

Сельскохозяйственные машины при использовании и хранении подвергаются воздействию различных силовых факторов, в результате чего изнашиваются и стареют. При этом увеличивается опасность возникновения отказов, нарушается работоспособность изделий. Обычно этому предшествует появление неисправностей, обусловленных изменением характеристик устройства, отклонением от нормальных режимов их использования.

Выделяют три источника воздействий:

- энергия окружающей среды, включая человека – оператора, управляющего машиной и производящего ТО и ремонт;
- внутренние источники энергии, связанные с рабочими процессами, протекающими в машине и сопряжениях деталей;
- потенциальная энергия, накопленная в материалах и элементах машины в процессе изготовления и ремонта (внутренние напряжения в отливке; напряжения, возникающие после проведения ремонта методами сварки и наплавки, монтажные напряжения и др.).

Все источники воздействия проявляются в виде механической, тепловой, биологической, химической энергии и вызывают в материале элементов машины необратимые процессы, приводящие к повреждению, деформации, изнашиванию, коррозии и другим изменениям начальных параметров машины.

Закономерности изменения свойств с.-х. машин и функции в зависимости от времени их работы, показаны на рисунке 10.

Как видно из графика, свойства машин, хотя и изменяются по различным закономерностям, но они имеют определенную общность. Эксплуатационные свойства машин постепенно ухудшаются, изменяется работоспособность деталей машин также и в период хранения.

Неизбежность ремонтных воздействий через определенные сроки обосновывается результатами ряда теоретических и экспериментальных исследований. Одной из существенных причин, вызывающих ремонт машин, проф. В.И. Казарцев называет неравнопрочность их элементов.

Неравнопрочность элементов машин обусловлена целым рядом причин.

1. Выпускаемые промышленностью тракторы, автомобили и с.-х. машины неоднородны по срокам службы своих элементов, что вынуждает потребителей многократно заменять или возобновлять недолговечные элементы при ТО и ремонте.

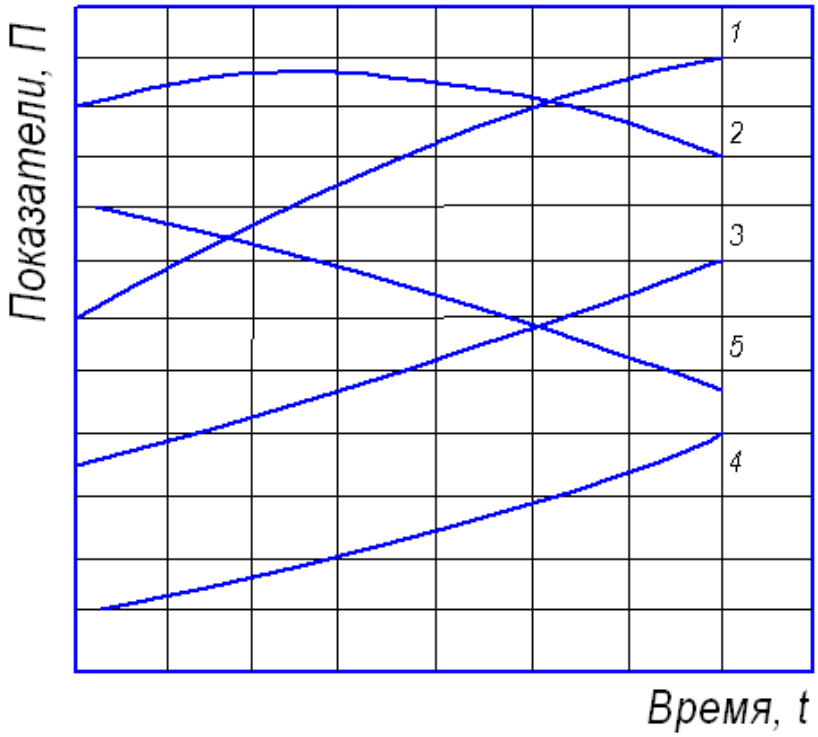


Рисунок 10 – Закономерности изменения свойств машины:
1 – среднее отклонение семян от оси рядка; 2 – КПД цепной передачи; 3 – расход топлива на гектар пашни; 4 – расход картерного масла; 5 – процент срезанных культиватором сорняков

Экспериментальные исследования позволили установить, что для большинства основных деталей автомобильных двигателей появление отказов после пробега 30-50 тыс. км свидетельствует о наступлении этапа старения двигателя.

Для оценки и сравнения неравнопрочности введем понятие коэффициента относительной долговечности, представляющего собой отношение среднего ресурса i-й детали χ_i к среднему ресурсу базовой детали χ_δ, например, блока двигателя, ресурс которого составляет 300 тыс. км:

$$K_d = \frac{\chi_i}{\chi_\delta}, \qquad (86)$$

где K_d – коэффициент относительной долговечности.

В таблице 11 приведены значения K_d для двигателей. Анализ таблицы показывает, что для реализации ресурса наиболее долговечных деталей необходимо проводить замену ряда менее долговечных деталей, притом некоторых из них – многократно. Так, пониженная износостойкость коренных подшипников коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53.11 и ЗМЗ-405 проявляется, как правило, в необходимости трехкратной замены вкладышей и одной замены коленчатого вала.

Таблица 11 – Значения коэффициента относительной долговечности основных деталей двигателей

Детали	Модель двигателя			
	ЗИЛ-130	ЯМЗ-238	ЗМЗ-53.11	ЗМЗ-405
Блок цилиндров	1,0	1,0	1,0	1,0
Гильза	0,95	1,0	-	-
Головка блока цилиндров	1,0	-	-	-
Прокладка головки блока	0,45	-	-	-
Поршень	0,57	1,0	0,73	1,0
Поршневой палец	1,0	1,0	-	-
Поршневые кольца	0,5	0,4	0,53	0,55
Шатун	0,95	1,0	-	-
Коленчатый вал	0,78	0,67	0,75	1,0
Вкладыши коренных подшипников коленчатого вала	0,39	0,35	0,36	0,55
Вкладыши шатунных подшипников коленчатого вала	0,33	0,35	0,53	0,8
Распределительный вал	1,0	1,0	1,0	1,0
Клапаны	0,67	0,64	0,62	1,0
Толкатель	1,0	-	1,0	1,0

2. Объем работ по восстановлению первоначальных параметров машины зависит от интенсивности изнашивания

или выхода из строя по другим причинам деталей и сопряжений при их работе. На интенсивность изнашивания деталей с.-х. машин оказывают влияние следующие факторы:

- качество материала, удельное давление, характер нагрузок, относительные скорости движения деталей, температурный режим и т.д.;

- чистота и точность обработки, выполнения сопряжений и регулировок, соблюдение соосности узлов при сборке, параллельности и перпендикулярности осей, привалочных плоскостей;

- количество, качество и чистота смазки, топлива, воздуха, влияние коррозирующих веществ, своевременность регулировок, свойства почвы, рельеф полей, качество хранения машин.

Большое значение на надежность тракторов оказывает правильная регулировка основных агрегатов при эксплуатации. К чему могут привести эти нарушения, видно уже из того, что увеличение угла опережения впрыска топлива на 15° у СМД-22 увеличивает максимальное давление в цилиндре на 40%, а скорость нарастания давления, т.е. ударность процесса сгорания, на 30%. При увеличении цикловой подачи топлива на 20% по отношению к нормальному значению средняя температура за такт расширения возрастает на 7%, температура выхлопных газов – на 15%, температура поршня – на 14%, гильзы – на 16%. При этом скорость изнашивания возрастает на 26%.

Не определяя степень влияния каждого фактора на интенсивность изнашивания, можно предположить, что при всех равных условиях интенсивность изнашивания большинства деталей пропорциональна выполняемой механической работе в единицу времени и предопределена условиями конструирования и изготовления с.-х. машины.

3. Неравнопрочность элементов машин закономерна, потому что современные основы машиностроения не позволяют выпускать машины с равной прочностью деталей по следующим причинам:

1) сопрягаемые детали, как правило, изготавливают из металлов и материалов с различными физико-механическими свойствами, которые поэтому изнашиваются с разной степенью интенсивности;

2) интенсивность работы деталей, узлов каждой машины в технологическом процессе неодинакова, поэтому и сроки их работоспособности разные;

3) применение при производстве машин системы допусков на размеры деталей, их посадку, на свойства материалов, показатели термической и механической обработки деталей обусловливает благоприятные и неблагоприятные сочетания этих параметров в сопряжениях и как результат – разные сроки их службы;

4) разнообразные условия эксплуатации машин, неодинаково влияющие на работоспособность отдельных деталей с.-х. машины.

Следовательно, чтобы с.-х. машина работала, необходим ремонт, восстанавливающий работоспособность и увеличивающий технический ресурс машин.

В нашей стране разработана планово-предупредительная система ТО и ремонта машин. Ее главная цель – поддержание техники в состоянии полной работоспособности, предупреждение ее преждевременного износа и выхода из строя за счет комплекса организационно-технических мероприятий, проводимых инженерно-техническими, ремонтными службами в плановом порядке. Планово-предупредительная система ТО – это концепции, положения и нормативы инженерного обеспечения работоспособности техники и повышения уровня эффективности ее использования. Основная ее идея состоит в том, чтобы управлять техническим состоянием машин путем обоснованного назначения видов и периодичности ТО, видов и методов ремонта, критериев предельного состояния, степени восстановления технического ресурса деталей машин и продолжительности эксплуатации до списания.

Управление техническим состоянием техники включает измерение параметров состояния ее составных частей, сравнение установленных значений с допускаемыми или предельными величинами, определение остаточного ресурса деталей, назначение вида и объема ремонтно-обслуживающих воздействий. Для измерения технических параметров состояния машины используют средства диагностирования.

В эксплуатации с.-х. машина может находиться и

различных состояниях, определяемых таблицей 1 ГОСТ 27.002-83.

Исправное состояние – изделие соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической и конструкторской документации.

Неисправное состояние – состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и конструкторской документации.

К неисправностям относят уменьшение производительности и экономичности машины ниже допустимых пределов, потерю точности измерительных средств, станков, стендов.

Работоспособное состояние – состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации.

Исправное изделие всегда работоспособно. Работоспособное изделие может быть неисправным, однако при этом неисправность не оказывает влияния на его функционирование. Например, автотракторные двигатели сохраняют работоспособное состояние, если подшипники коленчатого вала и детали цилиндропоршневой группы ЦПГ изношены, но эксплуатационные показатели двигателей в допустимых по ТУ пределах.

Неработоспособное состояние – состояние изделия, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и конструкторской документации.

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния изделия при сохранении работоспособного состояния. Повреждение может быть несущественным, когда работоспособное состояние объекта сохраняется, и существенным, которое может стать причиной нарушения работоспособного состояния.

Несущественные повреждения, в случае их не устранения, могут перейти в существенные с нарушением работоспособного состояния, т.е. привести к отказам.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния изделия.

При отказе эксплуатация изделия должна быть прекращена вследствие возникших технических неисправностей или работы его с недопустимыми отклонениями от заданных эксплуатационных показателей. Появление отказа всегда связано с возникновением неисправного состояния. Так, снижение мощности двигателя трактора ниже установленного предела является отказом. Одновременно с этим трактор переходит в неисправное состояние. Возникновение неисправного состояния не всегда, однако, означает появление отказа. Например, подтекание масла в агрегатах трактора свидетельствует об их неисправности, но не всегда приводит к отказам.

В зависимости от причин возникновения различают отказы конструкционные, технологические и эксплуатационные, возникшие в результате нарушения установленных правил конструирования, изготовления или ремонта, правил эксплуатации.

Исследованиями установлено распределение отказов для тракторов марок ДТ-75М, Т-4А, МТЗ: конструктивные отказы составляют 31,2%, технологические – 31,2%, эксплуатационные – 37,6% (для условий рядовой эксплуатации в Восточной Сибири).

По характеру возникновения отказы различают внезапные, постепенные, перемежающиеся.

Отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одного или нескольких параметров изделия, называют внезапным (например, резкое снижение давления масла в системе смазки двигателя из-за подплавления вкладышей). При постепенном изменении значения одного или нескольких параметров изделия отказ называется постепенным (постепенное нарушение работоспособности из-за естественного изнашивания тормозов, муфт сцепления в результате износа фрикционных элементов). Перемежающийся отказ – многократно возникающий сбой одного и того же характера. Например, ухудшение мощностных и топливно-экономических показателей двигателя из-за появления нагара в головке цилиндров двигателя; нарушение работоспособности

тракторного агрегата из-за налипания почвы на лемех плуга при пахоте на влажных почвах и др. Этот отказ зачастую самоустраняется при длительной работе машины в тяжелом режиме.

Независимый отказ не обусловлен отказом другого объекта, зависимый – обусловлен.

При возникновении отказа работоспособное состояние изделия может восстанавливаться или не восстанавливаться в зависимости от возникшей ситуации.

Объект, для которого в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособного состояния предусмотрено нормативно-технической и конструкторской документацией, называется восстанавливаемым; в противном случае – невосстанавливаемым.

Ремонт – комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности, а также ресурса изделий и его составных частей.

Ремонтируемое изделие – изделие, исправное и работоспособное состояние которого в случае возникновения отказа или повреждения предусмотрено в нормативно-технической и конструкторской документации.

Неремонтируемое изделие – изделие, исправное и работоспособное состояние которого в случае возникновения или повреждения невозможно восстановить.

Большинство объектов с.-х. машин восстанавливаемые и ремонтируемые. Невосстанавливаемыми (неремонтируемыми) являются поршневые кольца, вкладыши коленчатого вала, фрикционные накладки тормозов, сцепления, прокладки, уплотнительные кольца, различные шайбы, шарикоподшипники и т.д. Такие детали при ремонте машин заменяют.

Техническое обслуживание – комплекс операций или операция по поддержанию работоспособного или исправного состояния изделия при использовании по назначению, хранении и транспортировании.

Время эксплуатации машин определяется наступлением предельного состояния, при котором дальнейшее применение объекта по назначению недопустимо или нецелесообразно.

Установлены единые критерии оценки предельного состояния машин.

Критерий предельного состояния – признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и конструкторской документацией.

Критерии предельного состояния устанавливаются конкретно для определения наименований машин. Так, критериями достижения предельного состояния двигателей являются повышенный расход масла, увеличенный пропуск газов в картер, потеря мощности, интенсивное увеличение скорости изнашивания деталей, давление масла в системе смазки, повышение уровня вибрации и шума, увеличенная токсичность отработавших газов и т.д.

Состояние трактора считается предельным, если установлена необходимость проведения капитального ремонта двигателя, одного из агрегатов трансмиссии и одной или более составных частей рамы, тележки балансирования, кареток в сборе, рулевого механизма с гидроусилителем или гидросистемы. Критерии предельного состояния отдельных деталей машин приводятся в нормативно-технической документации на капитальный ремонт машин соответствующих марок.

Таблица 12 – Критерии предельного состояния отдельных сборочных единиц зерноуборочного комбайна

Сборочная единица	Состояние
1	2
Корпус жатки	Предельная деформация корпуса. Трещина в сварочных соединениях труб или балок корпуса. Предельная деформация пальцевого бруса
Корпус наклонной камеры	Трещины в сварных соединениях корпуса, вызвавшие нарушение его геометрии. Предельная деформация корпуса наклонной камеры
Цепочно-планчатый транспортер	Излом, скручивание верхнего вала

Рама молотилки	Трещины в сварных соединениях лонжеронов с поперечными брусьями и несущими кронштейнами более 40% от общей длина сварного шва. Перекосы рамы молотилки свыше допустимой величины
Молотильный барабан	Излом, изгиб, предельный излом посадочных мест под подшипники вала барабана. Предельная деформация подбичников. Трещины сварных швов опорного диска барабана. Ослабление или разрушение четырех и более заклепок одного подбичника
Соломотряс	Изгиб, излом, предельный износ шатунных шеек коленчатого вала. Разрушение, трещины, предельная деформация двух и более клавиш соломотряса, предельный износ вала под ступицей шкива привода

Окончание таблицы 12

1	2
Грохот	Предельная деформация, трещины рамы стрясной доски, рам, решета. Орыв резиновых отливов грохота. Предельный износ осей гребенок решета и деформация их, износ посадочных мест колебательного вала
Шнек	Обрыв по сварке всей спирали с формацией ленты. Предельный износ спирали, посадочных мест вала, его изгиб, излом. Предельная деформация, разрушение, износ кожуха
Элеватор	Предельный износ скребков и деформация их пластин жесткости, средней доски кожуха, а также ее разрушение и износ

Причинами прекращения эксплуатации являются невозможность обеспечения безопасности или эффективности эксплуатации машин и минимально необходимого уровня безопасности, значительные затраты на их эксплуатацию и ремонт (экономическая нецелесообразность), моральное старение машин. В противном случае скорость изнашивания деталей и роста зазоров в сопряжениях увеличиваются катастрофически быстро, что приводит к поломке деталей и аварии.

Классификация отказов машин

Одним из основных показателей надежности является формулировка отказа. Согласно ГОСТ 27. 002-83, отказ – событие, заключающее в нарушении работоспособности машин. Нарушение работоспособности машин возникает из-за отказов и неисправностей, вызываемых разными факторами конструктивного, технологического, производственного и ремонтного характера. Воздействия этих факторов на техническое состояние машин взаимосвязаны. Отказы машин в процессе эксплуатации возникают по причинам усталости материала, коррозионного разрушения, изнашивания поверхностей трения деталей, разрушения деталей из-за случайных нагрузок.

Учет и анализ отказов машин имеет большое практическое значение. Точная информация об отказах дает возможность количественно оценить безотказность машины. Сведения об отказах, вызванных разрушением деталей, позволяют оценить долговечность машины и уточнить нормы расхода запасных частей, данные о трудоемкости, длительности и стоимости ТО и ремонта, оценить ремонтопригодность машины. Совокупность всех этих сведений дает объективное представление о надежности и позволяет разработать мероприятия по ее повышению.

Отказы машин разнообразны по причинам, характеру проявления и последствиям. Причинами отказов является изменения свойств в элементах машин – случайные, единичные или систематические.

Единичные причины – это результат, например, скрытых дефектов в деталях, неожиданных перегрузок, превосходящих расчетные, случайных ошибок механизатора и пр. Эти причины вызывают отказы, не повторяющиеся в различных экземплярах машин.

Систематические изменения отражают повторяющиеся процессы, приводящие к одному и тому же механизму отказа. Это могут быть накапливаемые усталостные повреждения – микротрещины, переходящие в макротрещины, завершающиеся усталостным разрушением детали. Разрушение проявляется в усталостном выкрашивании, в износах, смятии или явлении заедания. Все эти причины приводят к появлению отказов – внезапных по появлению и постепенных по развитию.

Типовые отказы деталей, наиболее часто встречающиеся в условиях эксплуатации машин, приведены в таблице 13. По характеру возникновения отказы подразделяют на внезапные и постепенные.

Внезапный отказ возникает неожиданно в результате изменения значения одного или нескольких основных параметров машины.

Постепенный отказ возникает в результате постепенного изменения значений параметров машин, возрастающей потери работоспособности его элементов.

В период нормальной эксплуатации физическая природа

внезапных отказов заключается в усталости материала деталей и разрушений их из-за возникновения пиковых нагрузок, которых в эксплуатации избежать невозможно.

Таблица 13 – Типовые отказы деталей машин

Детали машин	Отказы	
	внезапные	постепенные
Сварные соединения	Разрушения в зоне шва	Трещины
Резьбовые соединения	Обрывы болтов, срыв резьбы	Ослабление затяжки крепления
Шлицевые и шпоночные соединения	Поломки	Смятие поверхности
Валы и оси	Поломки (усталостные и от перегрузки)	Износ (шеек)
Подшипники скольжения	Схватывание и выплавление антифрикционного слоя	Износ трущихся поверхностей
Подшипники качения	Заклинивание, поломки буртов, сепараторов, трещины колец	Выкрашивание поверхности колец, сепараторов, износ и смятие рабочих поверхностей
Муфты (фрикционные, сцепные)	Пробуксовка, перегрев	Начало пробуксовки, нечистое включение, разное включение
Зубчатые колеса	Поломка зубьев, заедание	Усталостное разрушение, смятие рабочих поверхностей
Червячная передача	Поломки, заедание зубьев колец	Износы, усталостные разрушения поверхностей зубьев колес
Ременная передача	Обрыв и соскакивание с ремня	Износ, пробуксовка, вытягивание ремня
Цепная передача	Обрыв цепи	Износ, вытягивание цепи

При нарушении правил эксплуатации внезапные отказы появляются в виде поломки деталей, их подплавления, недопустимых деформаций и прогара деталей и т.п.

Физическая природа постепенных отказов, т.е. износовых отказов, заключается в накоплении необратимых изменений в поверхностных слоях металла, приводящих к изменению размеров, формы, взаимного расположения и физико-механических свойств деталей и пар трения.

Классификацию отказов можно проводить с разных точек зрения, по различным признакам. В таблице 14 приведена схема, составленная в соответствии с ГОСТ 27.104-84.

Таблица 14 – Основные признаки классификации отказов машин

Классификационный признак	Отказ
Условия возникновения	Возникающий в нормальных или ненормальных условиях
Причины возникновения	Не связанный с разрушением, обусловленный им
Возможности последующего использования изделия	Полный, частичный
Характер изменения параметров	Внезапный, постепенный
Наличие проявлений	Очевидный, скрытый
Взаимосвязь отказов, элементов машины	Зависимый, независимый
Последствия отказа	Опасный, безопасный, тяжелый, легкий
Способ устранения	Устранимый заменой детали, регулировкой, чисткой, самоустраняющийся
Сложность устранения	Простой, сложный
Частота возникновения	Единичный, систематический, повторяющийся
Возможность прогнозирования	Непрогнозируемый, прогнозируемый по возрасту
Происхождение	Конструкционный, технологический, эксплуатационный
Возможности устранения причин возникновения	Устранимый, неустранимый

Приведенная классификация отказов охватывает большую

часть практики машиностроения и эксплуатации машин, но не является исчерпывающей.

Критерии оценки технического состояния машин

Оценку технического состояния машины при постановке ее в ремонт дают после разборки, осмотров и дефектоскопии ее деталей. При этом критериями оценки технического состояния машин являются значения износа и отклонений геометрической формы деталей, зазоров в сопряжениях с учетом неравномерности их рассеяния по одноименным деталям и сопряжениям. Сопоставляя фактические величины параметров с их предельными значениями, определяют техническое состояние каждой конкретной машины и выбирают рациональный способ восстановления ее деталей.

Вопросы контроля работоспособности и качества работы с.-х. машины приобретают исключительно важное значение и рассматриваются как один из основных путей повышения эффективности использования машин; контроль эксплуатационных показателей производится методами технической диагностики. Из всех известных методов технической диагностики наиболее универсальны акустический, виброметрический, световой, функциональный и комбинированный. Они позволяют не только унифицировать диагностические комплексы, но и автоматизировать процесс диагностирования.

В технической диагностике широко используется теория информации, т.е. рассматривается система состояний и связанная с ней система признаков.

Центральное место в теории информации занимает понятие энтропии системы. Энтропия характеризует степень неопределенности системы, которая зависит от числа n возможных состояний. Например, если система имеет шесть возможных состояний с вероятностями $P(A_1) = 0{,}95$, $P(A_2) = P(A_3) = \ldots P(A_6) = 0{,}01$, то можно утверждать априори, что она находится в состоянии A_1 ; неопределенность этой системы невелика.

В теории информации энтропия системы A, имеющей n возможных состояний с вероятностями $P(A_1)$, $P(A_2)$, $P(A_3)$, … $P(A_n)$, определяется зависимостью

$$H(A) = \sum_{i=1}^{n} P(A_1) \cdot \log \frac{1}{P(A_1)} = -\sum_{i=1}^{n} P(A_1) \cdot \log_2 P(A_i). \qquad (87)$$

Величина $H(A)$ называется энтропией системы.

Энтропия измеряется в двоичных единицах (битах).

Так как вероятности состояний системы $0 \le P(A_i) \le 1$, то энтропия представляет существенно положительную единицу.

За единицу количества информации принято количество информации, содержащейся в соотношениях об испытании конечной системы, состоящей из двух равновероятных событий. Метод энтропии применяют для оценки технического состояния рабочих поверхностей цилиндров, шестерен, находящихся в закрытых картерах коробок, и коробок перемены передач, задних мостов тракторов, автомобилей, комбайнов.

Диагностическими признаками машин являются:

1) выходные параметры машин, их узлов, определяющие по техническим условиям их работоспособное состояние;

2) давление масла в системе смазки;

3) пропуск газов в картере и давление газов в картере;

4) вибрация и шум;

5) температура масла и деталей;

6) токсичность отработавших газов;

7) состав и количество продуктов изнашивания в масле;

8) температура охлаждающей жидкости;

9) компрессия в цилиндрах;

10) расход масла на угар.

В ТУ на эксплуатацию и ремонт машин приводятся значения указанных параметров, соответствующие предельному техническому состоянию машин, их значения, при которых машины можно эксплуатировать.

Виды трения. Сущность теории трения

Трение – удивительный феномен природы. Оно подарило человечеству тепло и огонь, возможность в короткое время остановить поезд и автомобиль, ускорить химическую реакцию в сто тысяч раз, записать голос на пластинку, услышать звуки скрипки и многое другое.

Трение изучали Леонардо да Винчи, М.В. Ломоносов, Г.А. Амонтон, Ш. Кулон, Н.П. Петров, Л. Эйлер, Д.И. Менделеев, О. Рейнольдс, другие ученые.

В наше время трение изучали академики Н.Е. Жуковский. Е.А. Чудаков, В.Д. Кузнецов, П.А. Ребиндер, проф. А.А. Ахматов. И сегодня изучением трения, изнашивания и смазки машин занимаются многие ученые – чл.-корр. Б.В. Дерягин, акад. В.А. Белый, проф. И.В. Крагельский, проф. Е.И. Костецкий. За рубежом известными в этой области учеными являются Ф. Боуден, Д. Гейбор, С. Баходур, К. Лудема, Н.П. Су, Д. Бакли, Р. Куртель, Н. Краузе, Г. Уту, Н. Чихос, Г. Фляйшер, Т. Полькер, М. Хебда, Г. Данов и др.

До настоящего времени трение во многих его аспектах остается загадкой. При трении одновременно происходят механические, электрические, тепловые, вибрационные и химические процессы. Трение может упрочнить или разупрочнить металл, повысить, насытить металл водородом или обезводородить его, отполировать детали или сварить их. Трение является самоорганизующимся процессом, при котором с определенной последовательностью протекают явления, направленные на разрушение поверхности. Износ, возникающий при трении сопряженных поверхностей, является наиболее характерным видом повреждения большинства машин и механизмов.

Согласно современным представлениям, опирающимся на достижения в области физики твердого тела, теории вязкого и хрупкого разрушения металлов, представлений физико-химической механики, теории поверхностных явлений и исследований в области износа, можно определить основные факторы, определяющие характер и интенсивность протекания процесса.

Исходным положением является представление о дискретном касании шероховатых тел и как следствие этого – возникновении отдельных фрикционных связей, определяющих процесс изнашивания. Эти положения, развитые проф. И.В. Крагельским, позволяют связать износ поверхности с процессами, происходящими в деформированном микрообъеме материала, напряженное состояние которого зависит от нагрузки, вида трения, геометрического очертания

микронеровностей и физических свойств материала.

Изнашивание является сложным физико-химическим процессом. Раскрытию механизма износа материалов и тех закономерностей, которые определяют его протекание, посвящена обширная литература. На разных этапах развития науки и техники ученые выдвигали теоретические основы для объяснения природы трения и создавали гипотезы о протекании этого явления.

Исходные теоретические положения различных гипотез и теорий, выдвинутых в различные периоды развития науки и техники, можно разделить на четыре группы.

Первая – учения и теории, в которых трение объясняется упругими взаимодействиями поверхностей шероховатости двух перемещающихся тел: механическая теория трения.

Вторая – теории, объясняющие трение молекулярным взаимодействием двух перемещающихся поверхностей.

Третья – теории, которые объясняют сущность процесса трения одновременным действием – упругим и молекулярным.

Четвертая – теории, которые объясняют трение как процесс возбуждения атома в поверхностной решетки в результате передачи энергии от одного атома к другому.

Механическая теория. В основу ее положена теория упругих и неупругих механических взаимодействий элементарных неровностей, возникающих на трущейся поверхности при скольжении одного тела по другому.

Различные механические теории трения были выдвинуты в период развития механики и прикладных наук и основывались на указанных исходных теоретических положениях.

Первым исследователем трения был Леонардо да Винчи (1508 г.). Им впервые было сформулировано понятие о коэффициенте внешнего трения. Леонардо да Винчи полагал, что коэффициент трения является величиной постоянной (f = 0,25) для различных тел при условии одинаковой гладкости поверхностей.

Спустя 200 лет, в период интенсивного развития техники, Амонтон установил, что сила трения пропорциональна весу груза G и не зависит от величины площади касания:

$$F = f \cdot G, \tag{88}$$

где f – коэффициент трения.

В ранних исследованиях преобладали чисто механические представления. В основу взаимодействия было положено трение поверхностей абсолютно жестких твердых тел. Вопрос о динамической сущности внешнего трения впервые был поставлен в известных работах Ш. Кулона. Он указал на необходимость различать трение покоя и трение движения и установил что, трение обусловлено рядом причин – природой материала, протяженностью поверхности, давлением, протяженностью контакта, скоростью скольжения. Он полагал, что трение – это сочетание двух видов сопротивления: зацепления, пропорционального нагрузке и не зависящего от площади, и сцепления, зависящего от площади касания. Эта двойственная природа выражается законом

$$F = A + \mu N, \tag{89}$$

где F – сила трения, *Н;* A – константа, характеризующая способность трущихся тел к взаимному сцеплению; N – нормальная реакция; μ – коэффициент пропорциональности.

Механическая теория объясняет причины возникновения трения зацеплением шероховатостей трущихся поверхностей, имеющих форму выступов. Но она не может объяснить, почему для очень гладких поверхностей трение сильно возрастает, почему с увеличением давления нет непрерывного возрастания трения и т.п.

Молекулярная теория. Получила развитие в трудах Дезалье, Гарди и русского физика Б.В. Дерягина. Суть в следующем. Трение между поверхностями возникает в результате атомного взаимодействия этих поверхностей, образующих сопряжение. При этом под действием внешнего давления электронные оболочки атомов сближаются настолько, что развиваются отталкивающие силы, а силы, которые преодолевают их, и являются силами трения.

Б.В. Дерягин рассматривает взаимодействие сил как геометрическую сумму взаимно уравновешенных молекулярных и внешних сил:

$$F = \mu \cdot S_k \left(P_o + P_y \right), \qquad (90)$$

где F – сила трения, Н ; μ – коэффициент трения; S_k – площадь истинного контакта, м^2; P_o – удельная сила молекулярного взаимодействия, Па; P_y – удельное давление, Па.

Однако эта теория не объясняет причин механического повреждения поверхностей трения, взаимного внедрения и зацепления шероховатостей и т.д.

Молекулярно-механическая теория трения, основоположником которой является И.В. Крагельский, основана на предположении, что трение имеет двойственную природу и обусловлено как взаимным внедрением отдельных выступов поверхности, так и силами молекулярного притяжения двух тел. При больших неровностях поверхностей преобладают механические факторы, а после сглаживания выступов и для очень гладко обработанных поверхностей больше проявляются молекулярные факторы.

Исходя из представления о дискретной структуре контакта, И.В. Крагельский предложил расчет силы трения производить путем суммирования сопротивлений, возникающих на площадках молекулярного и механического взаимодействия:

$$F = \tau_{мех} + \tau_{мол} = \alpha \cdot S_k + \beta \cdot N, \qquad (91)$$

где $\tau_{мех}$ – составляющая силы трения механического происхождения, Н; $\tau_{мол}$ – составляющая силы трения молекулярного происхождения, Н; $S_к$ – фактическая площадь контакта, м^2; N – давление, Па; α и β – величины, определяемые из опыта.

Энергетическая теория трения и износа (Дубинин А.Д.) исходит из физических предпосылок, из которых следует, что процесс трения един, но эффекты, связанные с ним, различны и зависят от реальных условий работы механизмов.

Качественно процесс трения характеризуется термоэлектронными, термическими, акустическими и другими физическими явлениями, а количественно – механическим фактором. При соприкосновении двух металлов происходит процесс возбуждения атомов атомной решетки в частицах субмикроскопических неровностей поверхностного слоя,

возбуждение закономерно уменьшается в частицах микроскопических неровностей слоя в результате передачи механической энергии от одного тела к другому.

Механическая энергия поступательного движения трущего тела превращается в колебательную и волновую энергию субмикроскопических и микроскопических частиц поверхностного слоя и частично расходуется на механическое разрушение.

Потерянную в процессе трения механическую энергию можно представить суммой

$$E_{Ò} = E_{Ñ} + E_{Ì} + E_{ðàçð}, \qquad (92)$$

где E_C – энергия, воспринятая субмикроскопическими частицами; E_M – энергия, воспринятая микроскопическими частицами; $E_{разр}$ – энергия, затраченная на механическое разрушение материала трущейся поверхности.

Процесс возбуждения поверхностного слоя при трении характеризуется непрерывным превращением механической энергии в колебательную и волновую энергию субмикроскопических и микроскопических частиц поверхностного слоя.

Субмикроскопические частицы тела представляют слой, в котором механическая энергия превращается в атомную и молекулярную, генерируется в нем и приводит атом и атомную решетку в возбужденное состояние. Характеристика слоя такова, что в нем происходят поверхностные колебания температуры, электрических потенциалов, распространяющиеся на небольшую глубину.

Субмикроскопические частицы определяются молекулярным строением вещества. Энергию этих частиц поверхностного слоя (E_C) можно выразить уравнением

$$E_{C} = E_{r} + E_{a} + E_{ð} + E_{â}, \qquad (93)$$

где E_r – энергия электронного газа; E_a – внутренняя энергия атомов; E_p – энергия решетки; $E_в$ – энергия взаимодействия атомов и решетки.

Возбуждение способствует увеличению всех слагаемых.

Микроскопические частицы трущегося тела представляют объем массы тела, в котором механическая энергия превращается в упругую колебательную энергию.

Гидродинамическая теория трения. Жидкостная смазка характеризуется тем, что поверхности трения разделены слоем смазочного материала, находящегося под давлением. Явление трения при жидкостной смазке было открыто в 1883 г. Н.П. Петровым, создавшим основы гидродинамической теории смазки. В дальнейшем эту теорию разрабатывали Н.Е. Жуковский, С.А. Чаплыгин, О. Рейнольдс, А. Зоммерфельд, Е.М. Гутьяр и др.

Для определения силы трения Н.П. Петров предложил формулу

$$F = \frac{\eta \cdot \nu \cdot S}{h}, \qquad (94)$$

где F – сила вязкого сдвига в нагружаемой части подшипника, Н; η – абсолютная вязкость масла, Па·с; v – относительная скорость трущихся поверхностей, м/с; S – площадь поверхностей, м^2; h – толщина масляного слоя, мм.

Из этой теории следует, что положение вала геометрически правильной формы в подшипнике скольжения, имеющем также геометрически правильную форму, сопряженного с подшипником с некоторым зазором S, зависит от нагрузки, вязкости масла, конструктивных размеров вала и подшипника, частоты вращения вала.

Для определения наивыгоднейшего зазора, при котором обеспечивается оптимальная толщина масляного слоя, проф. В.И. Казарцев, основываясь на выводах гидродинамической теории трения, предложил следующую формулу:

$$S_{наив} = 0{,}467\, d \sqrt{\frac{n \cdot \eta}{k \cdot c}}, \qquad (95)$$

где d – диаметр вала, м; n – частота вращения вала, мин$^{-1}$; η – абсолютная вязкость масла, Па.с; k – удельное давление, Па; c – конструктивный поправочный коэффициент.

Максимально допустимый зазор, при котором еще сохраняется режим жидкостного трения, равен

$$S_{\max} = \frac{S_{наив}^2}{4\delta}, \quad (96)$$

где δ – неровности поверхности вала и подшипника.

Поддержание зазоров в допустимых пределах способствует увеличение долговечности сопряжений. Особенно важно это для работы подшипников в кривошипных механизмах, где сила удара изменяется пропорционально кубическому корню из величины зазора в четвертой степени:

$$F_y = \sqrt[3]{s^4}, \quad (97)$$

где F_y – сила удара, Н; s – зазор в сопряжении, мм.

Виды внешнего трения

Триботехника – наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки деталей машин.

Изнашивание деталей, машин зависит от условий их эксплуатации, вида и характера трения.

Внешнее трение – явление сопротивления относительному перемещению, возникающего между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним.

Изнашивание деталей, образующих неподвижные сопряжения, зависит от значений силы трения покоя, а для деталей, подвижных соединений – от характера перемещения трущихся поверхностей.

По характеру относительного движения различают трение скольжения и трение качения. Иногда оба вида трения проявляется совместно, когда качение сопровождается

проскальзыванием, например, в зубчатых и зубчато-винтовых передачах или между колесами и рельсами.

Схема видов трения приведена на рисунке 11.

Трение покоя – трение двух тел при предварительном смещении. Трение скольжения является наиболее распространенным в машинах. Оно характеризуется тем, что скорости соприкасающихся деталей в точках касания различны.

Трение качения – трение движения двух соприкасающихся твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению.

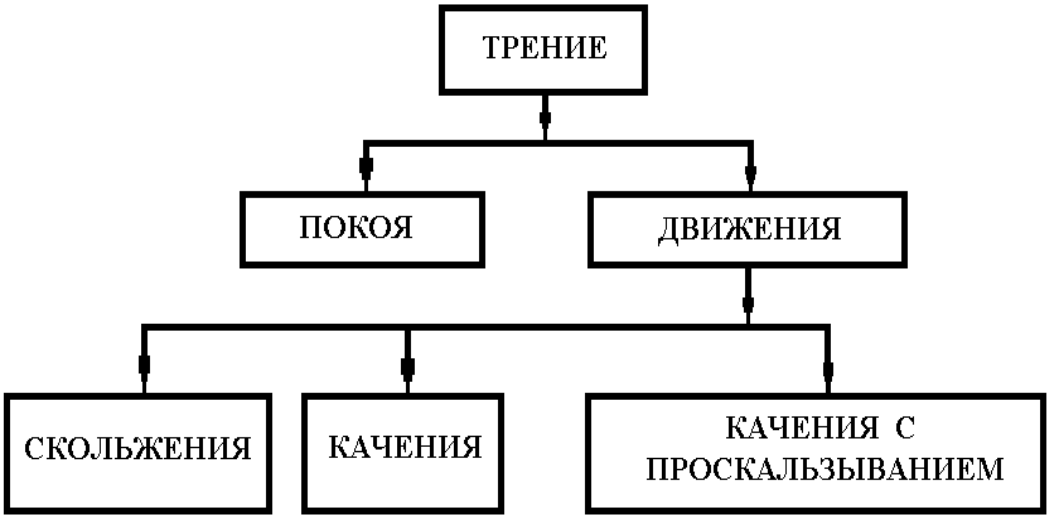


Рисунок 11 – Классификация видов трения в зависимости от относительного перемещения поверхностей

Трение качения с проскальзыванием – трение движения двух соприкасающихся тел при одновременном качении и скольжении.

В зависимости от наличия смазочного материала различают следующие виды трения: трение без смазки, граничное и жидкостное (рисунок 12).

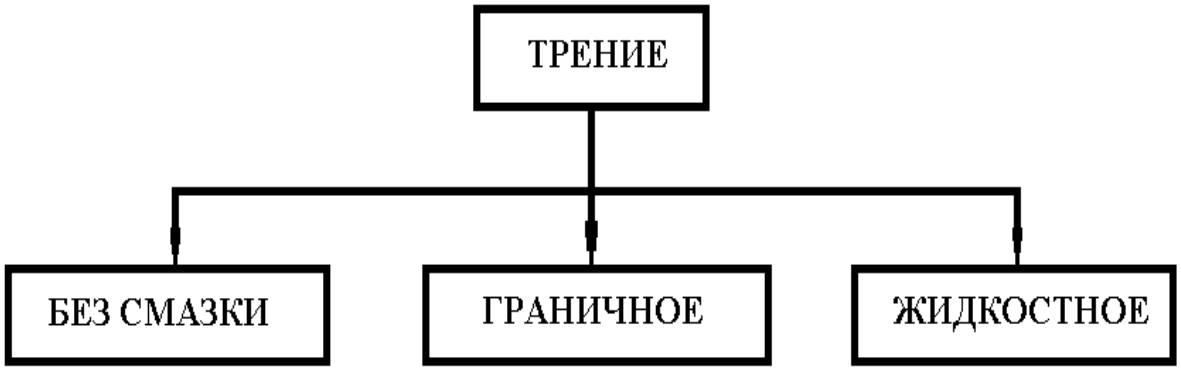


Рисунок 12 – Виды трения по наличию смазочного материала

Трение без смазки – трение двух твердых тел при отсутствии на поверхностях трения введенного смазочного материала всех видов. Такой вид трения имеет место в сухих муфтах, тормозах, ременных передачах, сухих фрикционных передачах, в соединениях с гарантированным натягом и обезжиренными поверхностями.

Граничное трение – это трение двух тел при наличии на поверхностях трения слоя жидкости, обладающего свойствами, отличающимися от объемных. Сильно нагруженные валы при сравнительно невысокой скорости вращения, качающиеся цапфы (палец поршня), детали, работающие при высоких температурах, – в этих сопряжениях имеет место граничное трение. Граничная пленка обладает высокой несущей способностью на сжатие, измеряемой в сотнях МПа, низким сопротивлением сдвигу, износ уменьшается в сотни раз. Особые свойства граничной пленки определяются молекулярным воздействием трущейся поверхности на слой смазки. При этом смазка должна обладать молекулярной природой, содержать удлиненные молекулы, обладающие активными группами. Исследования показывают, что даже незначительное содержание таких веществ, как дисульфид молибдена (MoS_2), присадки сераорганических соединений масел снижают износ.

В условиях граничного трения от смазки требуется создание прочной поверхностной пленки, что связано с явлением смачивания и налипания, способность взаимодействовать с поверхностными слоями материалов и изменять их структуру и свойства. Это происходит в результате способности поверхностно активных молекул адсорбироваться на трущейся поверхности. Такую способность масла называют маслянистостью. Поверхностно активные молекулы, адсорбируясь на трущейся поверхности, меняют характер взаимодействия и приводят к образованию граничной фазы. Граничная фаза обеспечивает образование прочной смазочной пленки, способной выдержать нагрузку и резко снизить износ. Эта способность граничной фазы препятствует контакту трущихся поверхностей деталей машин. Однако положительные качества смазки имеют место лишь при сравнительно невысоких нагрузках. При повышенных нагрузках происходит инверсия смазочного слоя, граничная фаза ускоряет износ. Эта инверсия является следствием того, что под давлением поверхностно активные молекулы проникают в микроскопические трещины, углубляя их, что приводит к ускоренному разрушению трущихся поверхностей деталей машин.

Таким образом, поверхностно активные молекулы

адсорбируются на трущейся поверхности, меняют характер взаимодействия этой поверхности с прилегающей смазкой и приводят к образованию граничной фазы. Граничная фаза обеспечивает образование прочной смазочной пленки, способной выдержать нагрузку и снизить износ. Такая способность пленки препятствует контакту трущихся деталей машин не только при движении, но и в состоянии покоя и последующего пуска.

Благодаря этому предупреждается износ поверхностей даже в такие периоды, когда в других случаях он неотвратим.

Жидкостное трение – явление сопротивления относительному перемещению, возникающему между двумя телами, разделенными слоем жидкости, в котором проявляются ее объемные свойства. Жидкостное трение характеризуется тем, что поверхности трения разделены слоем жидкого смазочного материала, находящегося под давлением.

Давление смазочного материала уравновешивает внешнюю нагрузку. Масляный слой называют несущим. При увеличении его толщины более толщины граничной пленки уменьшается степень влияния твердой поверхности на далеко отстоящие от нее молекулы масла. Слои, находящиеся на расстоянии более 0,5 мкм от поверхности, приобретают возможность свободно перемещаться один относительно другого.

При жидкостном трении сопротивление движению определяется внутренним трением масла и складывается из сопротивления скольжению его слоев по толщине масляного слоя. Этот режим трения со свойственными ему малыми коэффициентами трения является оптимальным для узла трения, с точки зрения потерь энергии, долговечности и износостойкости. Сила трения при жидкостном трении не зависит от природы сопрягаемых поверхностей.

Явление жидкостного трения было открыто в 1883 г. Н.П. Петровым, создавшим основы гидродинамической теории смазки.

Гидродинамическая теория трения устанавливает закономерности гидродинамического плавания вала в подшипнике скольжения. Из этой теории следует, что положение вала геометрически правильной формы в подшипники

скольжения, имеющего также геометрически правильную форму и сопряженного с подшипником с некоторым зазором S, зависит от нагрузки, вязкости масла, конструктивных размеров вала и подшипника, частоты вращения вала и выражается зависимостью

$$h = \frac{d^2 \cdot n \cdot \eta}{18{,}36 K S c}, \qquad (98)$$

где h – толщина слоя смазки, мм; d – диаметр вала, мм; η – абсолютная вязкость масла, Па·с; K – удельная нагрузка на вал, кг/м^2; S – зазор в сопряжении вал – подшипник, мм; c – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности вала и подшипника.

Сущность явления гидродинамического всплывания вала при определенной частоте вращения объясняется следующим образом. При частоте вращения $n=0$ вал опирается на подшипник. С момента начала вращения и при дальнейшем нарастании n вал, захватывая смазку, проталкивает ее в клиновидную щель зазора. Эта смазка приподнимает вал и смещает его в сторону вращения. При достижении определенной частоты вращения нагруженный вал всплывает в подшипнике, и рабочие поверхности разделяются слоем смазки. Центр вала с начала вращения описывает кривую, близкую к полуокружности.

При n, стремящейся к большой частоте вращения, оси вала и подшипника теоретически должны совпадать.

Виды изнашивания

Изнашивание – это процесс постепенного изменения размеров при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала или его остаточной деформации. Изнашивание является сложным физико-химическим процессом. Его изучению посвящена обширная отечественная и зарубежная литература. Все исследования касаются раскрытия механизма износа материалов и тех закономерностей, которые определяют его протекание.

При контакте двух сопряженных поверхностей и их относительном движении (перемещении) в поверхностных слоях возникают механические и молекулярные

взаимодействия, которые, в конечном итоге, приводят к разрушению микрообъемов поверхностей, т.е. к их износу.

Согласно современным представлениям, опирающимся на достижения в области физики твердого тела, теории вязкого и хрупкого разрушения металлов, представлений физико-химической механики, теории поверхностных явлений и исследований в области износа, можно определить основные факторы, определяющие характер и интенсивность протекания процесса изнашивания.

Исходным положением является представление о дискретном касании шероховатых тел и, как следствие этого, возникновении отдельных фрикционных связей, определяющих процесс изнашивания. Эти положения, развитые проф. И.В. Крагельским, позволяют связать износ поверхности с процессами, происходящими в деформированном микрообъеме материала, напряженное состояние которого зависит от нагрузки, вида трения, геометрического очертания микронеровностей, физических свойств материала.

Классификация видов изнашивания представлена в трудах ряда известных в этой области ученых. Она базируется на выделении основных факторов, определяющих тот или иной процесс изнашивания. В рядах случаев имеется лишь терминологическое различие, не изменяющее сути явлений. Совокупность явлений в процессе трения определяет вид износа и его интенсивность.

По характеру основных явлений разные виды изнашивания сопряженных деталей при трении можно объединить в три группы: механические, молекулярно-механические, коррозионно-механические. На рисунке 13 показана классификация изнашивания деталей машин.

Рисунок 13 – Классификация видов изнашивания деталей машин

Механическое изнашивание – это изнашивание в результате только механических воздействий материалов деталей. Разновидности механического изнашивания характеризуются специфическими явлениями, вызывающими разрушение микрообъемов материалов при трении, и неодинаковой интенсивностью процесса.

Абразивное изнашивание – механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц. Абразивными являются минералы естественного или искусственного происхождения, частицы кварца, продукты износа и т.п.

Типичными представителями деталей, подвергающихся интенсивному абразивному износу в почвенной среде, являются лемеха и отвалы плугов, лапы культиваторов, диски лущильников, зубья борон, плоскорезы, сошники, ножи уборочных машин, траки, пальцы гусениц и многие другие детали.

Абразивное изнашивание – один из наиболее распространенных видов изнашивания. В сельскохозяйственных машинах 60% случаев износа имеет абразивный характер. Основным источником попадания абразивных частиц в сопряжения машин является окружающая среда.

В одном кубометре воздуха содержится 0,04...5 г пыли, на 60...80% состоящей из взвешенных частиц минералов. Большинство частиц имеет размеры от 5 до 120 мкм, т.е. соизмеримы с зазорами в спряжениях с.-х. машин.

Основные составляющие кварца – двуокись кремния (SiO_2), окись железа *(Fe_2O_3),* соединений *Al,Ca, Mg, Na* и других элементов. Частицы обладают высокой твердостью. Так, *SiO_2* – 10780-11700, *Al_2O_3* – 20900-22900 МПа, что превышает твердость рабочих поверхностей большинства деталей сельскохозяйственных машин. Для снижения абразивной

составляющей изнашивания поверхности деталей должны иметь твердость в 1,3 раза больше твердости абразива.

Установлено, что относительная абразивная износостойкость ε связана с твердостью Hv линейной зависимостью

$$\varepsilon = в \cdot Hv, \quad (99)$$

где $в$ – коэффициент пропорциональности.

Относительная износостойкость зависит от твердости различных металлов.

Скорость абразивного изнашивания зубьев ковша экскаватора составляет 0,13-12,7 мм/ч, рабочих органов молотилок – 0,13-25,5 мм/ч.

Характер и интенсивность износа деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин зависят от физико-механических свойств почвы. Так, при работе на песчаных почвах детали изнашиваются в 8-10 раз быстрее, чем на глинистых.

Физико-механические свойства почвы являются одним из существенных факторов интенсивности износа деталей машин. Исследование изнашивающей способности почв с различными физико-механическими свойствами в лабораторных и эксплуатационных условиях дает возможность дифференцировать долговечность работы машин в зависимости от внешних условий их работы.

Исследованию были подвергнуты четыре типа почв и 16 разновидностей, которые являются преобладающими в почвенно-климатической зоне Восточной Сибири.

Для оценки величины изнашивающей способности почв лабораторными исследованиями определены коэффициенты изнашивающей способности почв. За эталонную абразивную среду принята почва с наименьшей изнашивающей способностью.

Фракционный состав почв и коэффициенты изнашивающей способности приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Фракционный состав и коэффициенты изнашивающей способности почв

Разновид	Фракционный состав, %	Содержан	Коэффициент

ности почв	1-0,05 мм	0,05-0,001 мм	ие, %	изнашиваемой способности почв *K*
1-я	140	76	57	2,23
2-я	6	77	66	1,84
3-я	12	82	60	1,61
4-я	8	84	59	1,32
5-я	28	59	57	2,64
6-я	2	85	55	1,0
7-я	16	76	57	1,81
8-я	15	76	60	2,0
9-я	63	28	62	4,0
10-я	10	80	68	3,0

Установлено, что с увеличением процентного содержания кварца и крупных фракций коэффициент изнашивающей способности почв повышается.

Гидро- и газоабразивное изнашивание – это абразивное изнашивание в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа. Гидроабразивное изнашивание характерно для деталей топливной аппаратуры, гидравлических систем, форсунок поливных машин. В роли жидкости – носителя, как правило, выступают смазочные материалы, топливо, тормозные и рабочие жидкости. При газоабразивном износе основным носителем абразивных частиц являются воздух, газ. Этот вид изнашивания характерен для двигателей, ЦПГ, газораспределительного механизма двигателя, трубопроводов пневмотранспорта, деталей вентиляционных систем.

Интенсивность изнашивания I определяется зависимостью

$$I = K \cdot \nu^m, \qquad (100)$$

где K – коэффициент, зависящий от свойств абразива; ν – скорость потока, м/с; m – показатель степени, зависящий от материала детали (для стали Ст 3 m – 2,3, для стали Ст 45 m – 2,5, для чугунных деталей – 2,8).

Усталостное изнашивание – механическое изнашивание поверхности трения или отдельных ее участков в результате повторного деформирования микрообъемов материала, приводящего к возникновению трещин, отделению частиц в подшипниках качения, искажению зубьев шестерен и др. При повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя возникают максимальные напряжения, переменные по времени, а в результате – максимальные напряжения сжатия и растяжений, которые распространяются по глубине в виде касательных напряжений, концентрируясь на некотором расстоянии от точки контакта.

Если переменные напряжения превышают некоторый предельный уровень, то в материале начинает протекать процесс постепенного накопления повреждений, образования и развития трещины, приводящей к разрушению детали.

Установлено, что в поликристаллическом теле в

отдельных неблагоприятно-ориентированных зернах даже при небольших амплитудах напряжений возникает циклическое скольжение по плоскостям скольжения кристаллов. Вследствие циклического скольжения возникает разрыхление, происходит накопление дефектов типа дислокаций, вакансий, приводящих после определенного числа циклов к появлению трещины в одном или нескольких зернах. В последующем трещины развиваются в одну макроскопическую трещину, а после того как трещина распространилась на значительную часть сечения, происходит внезапное разрушение.

Способность детали сопротивляться усталостному разрушению оценивается временем работы до обрыва частиц τ.

$$\tau = \frac{\mathrm{A}}{\delta_M^m}, \qquad (101)$$

где А – постоянная, характеризующая физико-механические свойства материала и режим работы сопряжения; δ_M^m – напряжение.

При этом наибольшее влияние на усталостное изнашивание оказывают условия трения, свойства металлов, применяемые смазочные материалы.

Кавитационное изнашивание – механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа лопаются вблизи поверхности, что создает местное высокое давление или высокую температуру (блок и головка блока цилиндров, наружные поверхности гильз цилиндров двигателей, детали водяных и масляных насосов).

Эрозионное изнашивание – это изнашивание поверхности в результате воздействия потока жидкости (газа). Так изнашиваются шлицы вторичного вала КПП, клапаны и седла клапанов двигателей, детали гидросистем и насосов.

Электроэрозионное изнашивание – изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока (коллекторы якорей электрических машин, щетки, детали прерывателя).

В целом эрозия металлов – постепенное разрушение поверхности металлических изделий в потоке газа или жидкости, а также под влиянием механических воздействий или электрических разрядов.

Изнашивание при заедании происходит в результате схватывания, глубинного вырывания материала с переносом его с одной поверхности трения на другую. Это наиболее опасный и разрушительный вид изнашивания.

В механизме изнашивания важную роль играет атомно-молекулярное взаимодействие материалов деталей, возникающее при сближении поверхностей. Результатом его является появление задиров, раковин (втулка колеса плуга, оси балансиров, подшипники коленчатого и распределительного валов, сопряжения деталей ВДГ двигателей). Этот вид изнашивания является аварийным и приводит к выходу из строя деталей, сопряжений деталей и машин в целом.

Интенсивность изнашивания зависит от режимов работы сопряжения – скорости относительного перемещения, нагрузки и температурных условий.

Е.И. Костецкий различает заедание в результате схватывания 1-го и 2-го родов.

Процесс схватывания 1-го рода возникает и развивается при малых скоростях скольжения (0,005-0,2 м/с) и давлениях $(5\text{-}100)\cdot 10^5$ Па.

Процесс схватывания 2-го рода развивается при больших скоростях скольжения поверхностей и повышенных давлениях.

В этих случаях в сопряжениях наблюдается увеличение температуры, вызывающее разупрочнение и разрушение поверхностей деталей.

Одной из мер предупреждения этого вида изнашивания является правильный подбор смазочного материала.

Коррозионно-механическое изнашивание характеризуется процессом трения материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой. Окислительное изнашивание происходит в том случае, когда на соприкасающихся поверхностях образуются пленки окислов, которые в процессе трения разрушаются, и вновь образуются в результате химической реакции материала с кислородом или окисляющей окружающей средой.

Скорость окислительного изнашивания невелика (0,05-0,1 мкм/ч). Повышение температуры способствует интенсивности роста окисных пленок, а вибрация – их разрушению.

Примером окислительного износа являются износы шеек коленчатого и распределительного валов, поршневого пальца двигателей и др.

Изнашивание при фреттинг-коррозии – это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей при их колебательных перемещениях. Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточно перемещения поверхностей при колебательных движениях с амплитудой 0,025 мкм.

Разрушение заключается в образовании на поверхностях мелких язвочек и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка.

Характерные условия изнашивания – малые скорости относительного перемещения (около 0,3 мм/с); путь 0,025 мкм трения эквивалентен амплитуде колебания до 30 Гц. Повреждения поверхностей вследствие фреттинг-коррозии служат концентраторами напряжений и снижают предел усталости.

Усталостные трещины появляются на валах под напрессованными деталями (сопряжения подшипников качения с валом и корпусом), деталях шлицевых и шпоночных соединений.

Универсальных средств борьбы с этим видом изнашивания нет. Если исходить из того, что взаимное микросмещение поверхностей не может быть исключено вследствие упругости материала, то для борьбы с фреттинг-коррозией следует: 1) уменьшить микросмещения за счет увеличения натяга; 2) снизить силы трения, повысив давление путем уменьшения площади контакта деталей. Другой метод предотвращения этого вида коррозии состоит в нанесении на поверхность электролитического слоя. Фреттинг-коррозию можно исключить кадмированием, лужением вкладышей, болтов и других деталей машин. Кроме того, уменьшить повреждение фреттинг-коррозией можно повышением твердости одной детали. Для гашения вибраций применяют демпфирующее

устройство, часто в механизмах используют резину, тефлоновую пленку.

Сущность эффекта безызносности. В середине 50-х годов при исследовании технического состояния узлов трения самолета ИЛ на разных этапах его эксплуатации Д.Н. Гаркуповым было обнаружено явление самопроизвольного образования тонкой пленки меди на поверхности деталей тяжело нагруженных узлов в паре трения сталь-бронза при смазывании спирто-глицериновой смесью. Пленка меди толщиной 1-2 мкм покрывала как бронзу, так и сталь, резко снижала интенсивность изнашивания пары трения и уменьшала силу трения примерно в 10 раз. Почти такое же явление было обнаружено в парах трения сталь-бронза при использовании смазки ЦИАТИМ-2а в шарнирно-болтовых соединениях самолета, а также в паре трения сталь-сталь компрессора холодильника при смазывании масло-фреоновой смесью. Медная пленка в паре бронза-сталь образуется в результате анодного растворения бронзы (легирующие элементы – *Zn, Sb, Al , Fe* – уходят в смазочный материал, и поверхность обогащается медью). После того как стальные и бронзовые поверхности покрываются медью, растворение прекращается, устанавливается режим избирательного переноса.

Характеристики внешнего трения. Сила трения – это сила сопротивления относительному перемещению двух тел при трении.

Предварительное смещение – явление малого относительного перемещения двух тел до перехода от покоя к скольжению при трении. Коэффициент трения – отношение силы трения к нормальной составляющей внешних сил, действующих на поверхности трения:

$$f = \frac{F}{N}, \qquad (102)$$

где f – коэффициент трения; F – сила трения; N – нормальная составляющая внешних сил.

Ориентировочное значение коэффициентов трения при трении без смазочного материала для материалов сопряжения:

в тормозных устройствах:

сталь-чугун 0,15-0,18;

сталь-ферродо	0,25-0,45;
сталь-сталь	0,03-0,1 (при жидкостной смазке);

в зубчатых передачах:

сталь-сталь	0,44;
бронза-чугун	0,21;
бронза-бронза	0,21;
чугун-чугун	0,15 (при граничной смазке);

для деталей ЦПГ:

чугун-чугун	0,03-0,1 (жидкостное трение);

для опор скольжения:

нейлон-сталь	0,4;
нейлон-сталь	0,15 (жидкостное трение);
полипропилен-сталь	0,3;
полистирол-сталь	0,5;
тефлон-сталь	0,2;

в уплотнительных устройствах:

резина (полиуретан)-сталь 1,6.

Закон изнашивания материалов в аналитической форме может быть представлен зависимостью:

$$I = \int_0^t f / P, \nu, \sigma, H, C, b / dt, \qquad (103)$$

где P – давление на поверхность трения; ν – скорость относительного скольжения; σ – модуль упругости материала; H – твердость материала (шероховатость, жесткость, напряженность состояния); C – вид трения и смазки; b – внешние условия (температуры, наложения вибраций).

Для расчета и прогнозирования надежности деталей машин при их износе, подборе рациональных материалов необходимо знать основные закономерности процесса повреждения материалов.

Показателями износа, в соответствии с общим методическим подходом по оценке степени повреждения, являются:

- линейный износ i, мкм;

- скорость изнашивания $\gamma = \frac{di}{dt}$;

- интенсивность изнашивания $j = \frac{di}{ds}$.

Методы и средства изучения износов

Существуют разнообразные методы изучения износов. На практике применяются как интегральные, так и дифференциальные методы оценки повреждений деталей машин. Классификация методов измерения износов приведена в таблице 16.

Таблица 16 – Классификация методов изучения износов поверхностей трения

Метод	Оценка признака	Измерение износа во времени	Распределение износа
Микрометрические измерения	Измерением размеров деталей, профилографирование	Периодическое	Дифференциальный
Искусственных баз	Методом отпечатков; методом вырезания лунок; методом слепок	Периодическое	Дифференциальный
По измерению параметров сопряжения	Измерением массы. Измерением объема, зазора в сопряжении	Периодическое Непрерывное	Интегральный
По содержанию металлических примесей в масле	Химическим анализом; спектральным анализом. При помощи радиоактивных изотопов, весовым анализом	Периодическое	Интегральный Дифференциальный
По изменению показателей функционирован	Измерением утечек и расхода рабочей среды.	Непрерывное	Интегральный

ия	Измерением давления рабочей среды. Измерение линейных и угловых перемещений. Измерением вибро-акустических параметров	Периодическое Непрерывное Периодическое	
По изменению радиоактивности детали	Метод поверхностной активации. Метод радиоактивных вставок	Непрерывное Периодическое	Дифференциальный

Рассмотрим основные методы, применяемые для измерения износа поверхностей при работе различных сопряжений в условиях эксплуатации или испытания.

Метод микрометрических измерений основан на измерении детали до и после изнашивания при помощи микрометра, индикатора, других приборов, точность которых находится в пределах 1-10 мкм.

Метод микрометрирования относится к традиционным методам измерения размеров и не учитывает специфику износа. Недостатками данного метода являются невозможность осуществлять измерение износа в процессе работы машины, необходимость разборки узла или демонтажа измеряемой детали, что сопряжено с большими затратами времени на разборочно-сборочные работы. Кроме того, частые разборки вызывает дополнительный износ, что значительно сокращает срок службы машин.

Профилографирование применяется при малых значениях износа, когда об взносе судят по профилограммам, снятых с исходной и изношенной поверхностей. Для изучения износов используют следующие приборы: профилографы типа ИЗП-5, ИЗП-17, ИГП -21, калибр ВЭИ -201 и др.

Профилографирование заключается в следующем. С одного и того же микроучастка поверхности детали снимают профилограммы, на которых повторяются контуры одних и тех

же микронеровностей. Вследствие износа вершины микронеровностей меняют свою форму, общая высота неровностей уменьшается. Определив это уменьшение от линии впадин, можно установить величину износа в пределах высоты неровностей. Этот метод применяется при проведении научных исследований, когда требуется определить характер износа поверхности детали.

Взвешивание – определение износа периодическим взвешиванием детали через некоторые промежутки времени и сравнение массы исследуемых деталей с исходной (новой). Для взвешивания применяет аналитические весы типа АДВ-200М, ВНЗ-2 с точностью измерения (0,05-5 / 10^{-6} г).

Этот метод требует разборки узла машины. Взвешиванием нельзя выявить изношенные участки детали и характер ее износа.

Определение износа *по содержанию продуктов изнашивания в смазке.* Этот метод называют «определением железа в масле». Основан на взятии пробы отработанного масла, в котором скопились продукты износа, представляющие собой металлические частицы, окислы металлов и продукты химического взаимодействия металлов с активными компонентами смазки.

Применение этого метода позволяет избежать разборки машин и их узлов. Метод применяется в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации для измерения интегрального износа различных узлов машин, двигателя, КПП, задних мостов. Точность метода характеризуется чувствительностью приборов к содержанию металлических примесей в масле, которая составляет 10^{-6} -10^{-8} г/см^3 масла.

Для анализа проб масла на содержание железа и других составляющих применяются различные методы.

Химический – основан на определении содержания железа и других продуктов износа в золе сожженной масляной пробы. Непосредственный анализ пробы сложен и длителен.

Спектральный – основан на определении содержания металлических примесей в смазке посредством спектрального состава пламени при сжигании пробы масла о помощью спектрографов типа ДФС-10, ИСП-22, 28, фотоэлектрических установок МФС-2, МФС-3.

Метод достаточно сложный, длительный, требует высокой

квалификации персонала.

Радиометрический – основан на измерении радиоактивности продуктов изнашивания, содержащихся в смазочном масле.

Активационный, колориметрический анализы и др.

Метод поверхностной активации – это оценка величины износа, основанная на измерении снижения радиоактивности при изнашивании детали, в которой на заданном участке создан радиоактивный объем глубиной 0,05-0,4 мм.

Введение радиоактивного элемента производится при отливке детали, электролитическим нанесением радиоактивных изотопов на поверхность детали, методом вставок, поверхностной активацией. Радиоактивное пятно с активностью до 10 миКИ образуется на выбранном участке исследуемой детали бомбардировкой ее пучком ускоренных заряженных частиц (частицы, протоны, нейтроны) с энергией 13,2 МэВ и силой тока 1 мкА/с.

Основными радиоактивными изотопами являются кобальт (период полураспада (6500 ч), марганец 54 (7000 ч), цинк 65, олово 123, железо 56 и др.

Определение радиоактивности основано на измерении излучения различными методами.

Схемы для измерения износа методом поверхностной активации и используемой аппаратуры основаны либо на регистрации суммарного количества импульсов от источника излучения сцинтилляционный счетчик, либо на определении количества импульсов данной амплитуды в единицу времени (газоразрядный счетчик Гэйгера-Мюллера). При включении счетчика в систему смазки двигателя можно быстро и достаточно точно определить влияние отдельных эксплуатационных факторов на износ двигателя.

Определение износа методом искусственных баз. Перед испытанием на поверхности детали делают углубление определенного профиля. Расстояние от поверхности до дна углубления измеряют непосредственно или косвенным путем. Разница результатов измерения до и после испытаний дает величину линейного износа в зоне нанесенного углубления. Углубления делают путем вдавливания индентора в виде пирамиды или конуса, вырезанием вращающимся резцом

остроугольной лунки или вышлифовыванием лунки диском.

К методу искусственных баз относится также способ определения износа снятием негативных оттисков.

Остановимся на основных разновидностях этого метода.

1. Определение износа способом нанесения отпечатка индентором в виде пирамиды. В заданном месте заранее делается отпечаток вдавливанием алмазной 4-гранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями 136°. Такая пирамида применяется в приборах Виккерса (наибольшая диагональ отпечатка 1,0 мм) и в приборах ПМТ-2 и ПМТ-3 (наибольшая диагональ 240 мм).

Диагональ отпечатка измеряется с помощью измерительного микроскопа с увеличением в 50-80 раз, снабженного винтовым окуляр-микроскопом.

2. Определение износа способом вырезания или вышлифовывания лунок. Этот метод применяется для определения износа хорошо обработанных поверхностей деталей. Сущность метода заключается в том, что на поверхности детали, износ которой подлежит определению, вырезается небольшая лунка, дно которой очерчено дугой известного радиуса. С помощью микроскопа измеряется длина лунки до и после изнашивания поверхности и по разности этих длин вычисляется линейный износ детали в месте расположения лунки.

Для определения износа деталей ЦПГ двигателей используют приборы типа УПОИ-6, УПОМИД-3, в которых предусматривается вырезание лунки, установление координат местонахождения лунки. Лунки располагают перпендикулярно направлению трения. Глубина лунок может быть 50-120 мкм при длине 1,3-3 мм. Для шлифования лунок используют карборундовые диски диаметром 25 мм и толщиной 0,2-0,3 мм. Этот метод является универсальным.

3. Определение износа способом негативных оттисков. На изнашиваемой поверхности делают риски, с которых при помощи пластического материала (листового свинца толщиной 0,5-2 мм) снимают негативные оттиски, позволяющие измерять глубину нанесенных рисок. Оттиски снимают до и после испытаний на изнашивание.

Критерии для установления предельно допустимых износов деталей машин

Под критерием предельного состояния машины, агрегата понимают признак или совокупность признаков, при появлении которых целесообразен ремонт с полным восстановлением ресурса. Изменение размеров и геометрической формы деталей вследствие износа по-разному сказывается на характере их работы в механизме. В одних случаях, когда деталь является рабочим органом орудия, эти изменения могут привести к ухудшению качества работы орудия – пахоты, уборки, молотьбы и т.п. и к форсированному износу рабочей детали. Одновременно с отмеченным могут измениться и такие показатели работы машин, как затраты мощности на выработку единицы продукции, расход эксплуатационных материалов и пр.

В других случаях, когда деталь является рабочим звеном передаточного механизма, изменение зазоров влияет на точность положения этого звена в механизме, что также вызывает изменение качества работы и износ всего механизма.

Технологические критерии предельного состояния представляют собой признаки, количественно характеризующие процессы как результат использования данной детали в машине. К таким признакам относятся потери зерна и смятие стеблей из-за затупления ножей режущего аппарата, неполное выдаивание молока вследствие ухудшения технического состояния деталей вакуум-насоса и пр.

Таким образом, износ деталей каждой основной части машины – двигателя, КПП, трансмиссии, рабочего органа – может привести к форсированному износу их механизмов, к снижению качества работы рабочего органа, к снижению экономических показателей.

В связи со сказанным, для установления предельно допустимых износов деталей и сопряжений Г.В. Веденяпин предложил следующие критерии: технический, технологический (качество работы) и экономический.

При использовании критериев необходимо иметь в виду, что хотя каждый из них в принципе может быть применен для

установления предельно допустимого износа любой детали, все же основным критерием для деталей определенной части машины, в зависимости от ее назначения, будет являться один. Остальные два практически не могут быть использованы или будут иметь вспомогательное, контрольное значение.

Иначе обстоит дело с экономическим критерием. Применение его в качестве контрольного в любом случае, как правило, целесообразно. Решение экономической задачи сводится к отысканию минимума амортизационных и эксплуатационных затрат в зависимости от наработки машины.

Теоретическое обоснование предельных значений зазоров для сопряжений типа «поршень-цилиндр», «плунжер-гильза». В основу методики обоснования предельных значений зазоров положена теория гидродинамического трения и смазки. Здесь за исходный момент принимается смазка как основной фактор, предупреждающий износ. Кроме того, смазка является уплотняющим средством. Теоретические зависимости определяют наивыгоднейшие условия жидкостного трения работы сопряжений и положены в основу расчета скользящих подшипников. Для решения практических вопросов эти зависимости позволяют теоретически обосновать крайние значения зазора (S_{min} *и* S_{max}*),* в пределах которых может быть сохранен режим жидкостного трения. Момент перехода режима от жидкостного к полужидкостному и принят за допустимый предел изменения зазора.

Соотношение между вязкостью масла, скоростью перемещения поверхностей и величиной зазора таково, что имеет место ламинарное движение слоев смазки. Сила вязкого сдвига одного слоя по другому, по закону жидкостного трения, установленному Ньютоном, выражается равенством

$$F = S\eta\frac{dv}{dt}, \qquad (104)$$

где F – сила вязкого сдвига одного слоя жидкости по другому; S – величина поверхностного слоя; η – абсолютная вязкость жидкости; $\frac{dv}{dt}$ – изменение скорости по высоте слоя жидкости.

Сила сдвига на единицу поверхности

$$\tau = \eta \frac{dv}{d\eta}. \qquad (105)$$

4. ИСПЫТАНИЯ МАШИН НА НАДЕЖНОСТЬ. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Система испытаний на надежность

Система испытаний предназначена для эффективного воздействия на качество машин на всех стадиях планово-предупредительной системы ТО и ремонта. Основной целью системы испытаний является получение объективной и достоверной информации о фактических значениях показателей качества и надежности отремонтированных машин и соответствии их технической и нормативной документации.

Получение показателей надежности на основании испытания машин и их элементов является важной, но сложной задачей, поскольку оно связано со значительными затратами времени и средств.

Сложность испытаний обусловлена:

1) их длительностью, поскольку современные машины обладают достаточно высокими сроками службы;

2) значительной дисперсией показателей надежности, так как сильное влияние на них оказывают условия эксплуатации и режимы работы машины;

3) большим числом требований, которые предъявляются к машинам.

Поэтому различают разнообразные виды и методы испытаний, классификация которых приведена на рисунке 14.

Государственные и ведомственные испытания с.-х. машин проводятся в соответствии с ГОСТом и подразделяются на:

- предварительные, т.е. на стадии испытания и подготовки машин к серийному производству;
- контрольные, т.е. после постановки машин на серийное производство.

При испытаниях оценивают соответствие фактических показателей надежности установленным нормативам и делают заключение о возможности продолжения производства или ремонта машин.

Исследовательские испытания проводят при изучении влияния отдельных факторов на надежность машин, планировании ремонтной службы, расчетах потребности в

запчастях и др.

Исследовательские испытания могут быть стандартными и специальными. При стандартных испытаниях обычно объектами являются образцы изделий (испытания на износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и т.д.), а результаты испытаний непосредственно не определяют показатели надежности.

Специальные испытания проводят на стендах, полигонах и в условиях эксплуатации.

Каждый из этих типов испытаний подразделяется на виды, для которых, с учетом их особенностей, рассматриваются и применяемые средства испытаний, методы оценки показателей надежности и принятия решений.

<table>
<tr><td colspan="4">Тракторы, с.-х. машины и их агрегаты</td></tr>
<tr><td colspan="4">Объекты испытаний</td></tr>
<tr><td>Опытные</td><td>Модернизированные</td><td>Серийные</td><td>Отремонтированные</td></tr>
<tr><td colspan="4">Виды испытаний</td></tr>
<tr><td>Государственные</td><td>Ведомственные</td><td>Исследова-тельские</td><td>Заводские</td></tr>
<tr><td colspan="4">Методы испытаний</td></tr>
<tr><td colspan="2">Натуральные</td><td colspan="2">Ускоренные</td></tr>
<tr><td colspan="4">Условия испытаний</td></tr>
<tr><td>Стендовые</td><td>Полигонные</td><td>Нормальная эксплуатация</td><td>Рядовая эксплуатация</td></tr>
</table>

Рисунок 14 – Классификация испытаний с.-х. машин на надежность

Заводские испытания в основном выполняют для продукции серийного производства и отремонтированной техники с целью установления работоспособности и устранения возможных неисправностей.

Объектом испытания могут быть:

1. Образцы, когда необходимо испытать физико-механические свойства материалов, определяющих надежность машины.

2. Сопряжения и кинематические пары, если необходимо учитывать влияние конструктивных и технологических факторов на срок службы данных сопряжений (испытание подшипников, зубчатых колес, направляющих шарниров и т.д.).

3. Узлы машины, когда необходимо учитывать взаимодействие отдельных механизмов и элементов конструкции и их влияние на показатели работоспособности машин (испытание двигателей, коробок перемены скоростей, задних мостов и т.п.).

4. Машина в целом, когда показатели надежности учитывают взаимодействие всех механизмов и узлов в машине, условия ее эксплуатации и режимы работы.

5. Система машин, когда показатели надежности учитывают взаимодействие отдельных машин, связанных в единый производственный процесс (система машин по уборке с.-х. культур и др.).

Натурные (эксплуатационные) и ускоренные испытания необходимы для получения оценок уровня надежности в эксплуатации машин в реальных климатических и режимных условиях. Испытания машин в условиях хозяйства – основной вид испытаний машин на надежность. Эти испытания используются как контрольные и проводятся на машинно-испытательных станциях (МИС) в условиях подконтрольной эксплуатации, при соблюдении правил эксплуатации, ТО и ремонта, с непрерывным хронометражным периодическим определением отдельных параметров и т.д.

Полигонные и стендовые испытания широко используются на стадии разработки конструкции машин, их модернизации или в исследовательских целях.

При полигонных испытаниях с.-х. машины эксплуатируют в экстремальных имитационных режимах для выявления прочности конструкции, а иногда и для определения работоспособности. При этом значительно сокращаются продолжительность, трудоемкость и стоимость испытаний, повышаются точность, достоверность и воспроизводимость получаемых результатов.

Ускоренные испытания

Ускоренные испытания позволяют в более короткие, чем в условиях эксплуатации, сроки определить основные количественные показатели надежности или дать их сравнительную оценку для сопоставляемых изделий.

В последние годы накоплен значительный опыт проведения ускоренных испытаний. Созданы стенды для испытания многих деталей, узлов, отработаны методы испытаний.

Узловыми вопросами ускоренных испытаний являются: выбор режимов нагружения объектов испытания, создание технических средств для воспроизведения выбранных режимов нагружения и определение коэффициентов перехода от результатов ускоренных испытаний к ожидаемым при эксплуатации машин.

Ускоренные испытания можно классифицировать по ряду признаков.

1. Сокращение перерывов в работе изделия, отдельных его элементов. Этот способ дает наибольшее ускорение испытаний для изделий кратковременного сезонного использования (например, с.-х. машин), изделий и их отдельных элементов, время использования которых меньше длительности перерывов (пусковые двигатели, электрические лампы). Он позволяет с достаточной достоверностью прогнозировать показатели надежности в реальных эксплуатационных условиях.

2. Увеличение числа циклов в единицу времени. Принципиальное отличие этого метода от предыдущего заключается в следующем. При первом методе ускорение достигается за счет уплотнения времени эксплуатации при сохранении числа циклов нагружения в единицу времени. В рассматриваемом методе ускорение достигается за счет изменения скоростного режима, но так же с сохранением весьма близкого к эксплуатационному характеру потерь ресурса за каждый цикл нагружения, т.е. ускорение, достигается за счет увеличения частоты дискретно накапливаемых повреждений. В качестве примера последнего способа ускорения можно привести увеличение числа оборотов

зубчатой передачи, числа сжатий пружины и т.д.

3. Форсирование режимов нагружения. При этом методе изменяется количественная сторона процесса накопления повреждений, т.е. увеличивается доля потери ресурса за каждый цикл нагружения. При прогнозировании по этому методу следует учитывать, что форсирование нагрузочного режима испытаний приводит к уменьшению рассеивания показателей долговечности. Этот метод широко применяется при испытании шестерен (увеличение крутящего момента), пружин (увеличение предварительной затяжки), подшипников качения (увеличение приведенной нагрузки) и т.д.

Примерами ускоренной обкатки и испытания автотракторных двигателей после ремонта являются различные технологические приемы:

1. Ускоренная обкатка двигателей с применением присадки в картерном масле (используется раствор коллоидной серы в концентрации 0,9÷1,4%).

2. Ускоренная обкатка двигателя с применением специальных масел ОМ-2 и ОКМ (введены поверхностно-активные химические элементы – сера, хлор, фосфор).

3. Ускоренная обкатка двигателей с применением присадки АЛП-2 к дизельному топливу (присадка представляет 30% раствор органополиалюмооксана).

4. Ускоренная обкатка двигателей с применением мелкодисперсной обработкой присадки (4-5 г каолина и литр масла; зернистость порошка 0,1-10 мкм).

5. Ускоренная обкатка двигателей с применением электрического тока (U = 0,8-1,2В ; I = 3,0-6,0А, время обкатки 25-30 мин).

6. Усиление воздействий на изделие условий окружающей среды (температура, влажность, агрессивность).

7. Усиление, воздействия абразивной среды; этот метод широко используется при сравнительных испытаниях на долговечность изнашивающихся деталей.

8. Применение статистических методов анализа результатов испытаний (например, при использовании метода последовательного анализа и др.).

Наиболее достоверным способом получения результатов являются испытания в условиях рядовой эксплуатации. Для

сокращения времени испытаний целесообразно использовать различия в климатических условиях нашей страны. По мере окончания периода с.-х. работ машину смещают в другую климатическую зону и таким образом увеличивают наработку машины до необходимой для оценки точности показателей надежности машины. Такие испытания являются по своей сущности натурными. Однако для оценки эффективности испытаний необходимо ввести условный коэффициент перехода (ускорение), который бы определял соотношение между фактической и нормативной выработками за сезон.

Эффективность ускорения характеризуется коэффициентом

$$k_y = \frac{T_н}{T_ф}, \qquad (106)$$

где $Тн$ – время безотказной работы при нормальных условиях; $Тф$ – время безотказной работы при форсированных условиях.

Для машин, выпускаемых промышленностью серийно, наиболее прогрессивным является метод статистического прогнозирования, основанный на сборе материала об отказах большого числа машин, но за короткое время испытаний.

Значение ускоренных методов испытаний на надежность очень велико, так как в них – ключ к получению своевременных и достоверных данных.

Особенность таких испытаний – использование реальных деталей в условиях, максимально приближенных к действительности. С учетом результатов испытаний на надежность выявляют детали и узлы, определяющие надежность машин, уточняют посадки в сопряжениях и допуски на размеры, отклонения от формы и взаимного расположения, шероховатость поверхности деталей, разрабатывают конструкторские, технологические, эксплуатационные и ремонтные мероприятия по повышению надежности машин.

Износные испытания

Надежность техники зависит от физико-механических свойств деталей. Основными из них являются износостойкость и усталостная прочность. Испытания стойкости материалов, т.е. их сопротивляемости разрушению, являются исходными

для суждения о надежности тех деталей, в которых эти процессы играют основную роль в потере работоспособности. Испытания проводят для изучения характера и интенсивности разрушения материалов образцов в условиях, близко моделирующих условия эксплуатации (вид нагрузки, скорость, температуры, смазки); конструкция испытательной машины должна обеспечить весь необходимый диапазон условий испытания. На все виды испытаний разработаны ГОСТы: испытания на усталость – ГОСТ 25.502-79, трение и изнашивание в машинах – ГОСТ 23.220-84.

Рассмотрим особенности составленных методик испытаний. Как известно, основным условием правильности проведения ускоренных испытаний является принцип подобия, т.е. предельные значения факторов должны выбираться исходя из условий сохранения физики отказов, т.е. чтобы вид и характер разрушения были идентичны при реальных условиях эксплуатации машин. Основным условием подобия является постоянство коэффициента перехода:

$$K_n = \frac{t_Э}{t_C}, \qquad (107)$$

где $t_Э$ – время работы детали в условиях эксплуатации, ч; t_C – время работы детали в условиях стендовых испытаний, ч.

Следствием этого условия является сохранение функциональной зависимости протекания процесса возникновения отказа.

Рассмотрим метод определения коэффициента ускорения по результатам измерений износов. Такой способ существенно сокращает время, необходимое для определения показателей надежности.

Пусть реализация износа может быть представлена в виде степенной функции

$$I = a + b^{\nu}, \qquad (108)$$

где a, b – некоторые случайны величины с известным законом распределения; ν – постоянный параметр.

Для этой зависимости вероятность отказа определяется выражением

$$Q(t) = F_0\left[\frac{I_n - \bar{a} - \bar{b}t^{\nu}}{\sqrt{D(a) + D(b)t^{2\nu}}}\right], \qquad (109)$$

где In – предельный износ.

Коэффициент ускорения в этом случае равен

$$K = \gamma\sqrt{\frac{\overline{b_c}}{b_э}}, \qquad (110)$$

т.е. определяется отношением средних значений коэффициентов b, а для подобия режимов необходимо, чтобы коэффициенты вариации коэффициентов b_c и $b_э$ были равны.

Таким образом, для оценки показателей надежности изнашивающихся деталей методом ускоренных стендовых испытаний необходимо:

1. Путем микрометража собрать данные в условиях эксплуатации об износах исследуемых элементов или поверхностей деталей.

2. Статистически обработать имеющиеся данные, проверив соответствие нормальному закону распределения в каком-либо сечении по времени наработки и определив параметры закона распределения в каждом сечении.

3. Методом наименьших квадратов вписать зависимость

$$I_э = a_э + b_э t^{\nu} \qquad (111)$$

и определить коэффициенты $a_э$, $b_э$, ν.

4. Определить значение коэффициента $b_э$.

5. То же самое повторить на стенде на малом количестве образцов, определив $\overline{b_c}$.

6. По приведенной выше формуле определить коэффициент ускорения K.

Стенды с износным режимом нагружения образуют самую большую группу – машины трения СМЦ-2, МИ-1М, Х4-Б, кольцевые почвенные каналы и др., так как износ служит причиной около 60% отказов тракторов и с.-х. машин.

Такие испытания позволяют выявить общие закономерности изнашивания деталей и оценивать возможные изменения ресурса деталей в зависимости от различных сочетаний конструктивных параметров, материаловедческих и технологических факторов.

В разработке методологии абразивных испытаний рабочих органов имеются значительные трудности, обусловленные необходимостью применять почвенную массу и сложностью поддержания постоянства ее изнашивающей способности.

Результаты исследований относительной износостойкости позволили получить коэффициенты относительной абразивной износостойкости ε восстановленных деталей различными видами наплавки и используемых наплавочных материалов, оценить влияние на нее режимов и тепловых условий процесса (таблица 17).

Таблица 17 – Относительная абразивная износостойкость металлопокрытий

Вид наплавки, наплавочные материалы, защитные среды	ε
Наплавка электродными проволоками:	
30ХГСА + флюс АН-60	1,33
30ХГСА + флюс АН-348А	1,36
30ХГСА + газ CO_2	1,28
30ХГСА + газ А	1,40
Наплавка порошковыми проволоками:	
ПП-3Х2В8 + флюс АН348А	1,30
ПП -3Х13-0	1,70
Плазменная наплавка легированными порошками:	
ПГ-ХН80СР4 + газ азот	1,35
Т-590П + газ CO_2	3,80
ФБХ-6,2 + газ CO_2	1,50

Усталостные испытания

Виды случайных режимов нагружения при эксплуатации тракторов и с.-х. машин разнообразны. Наиболее типичными являются режимы непрерывного действия, которые могут быть положены в основу при физическом моделировании случайных процессов на стенде.

Так как в эксплуатации усталостное разрушение возникает обычно после продолжительного периода работы машины (2-3 года и более), то принятие стендового режима нагружения, в частотном отношении одинакового с эксплуатационным, значительно удлинило бы срок испытаний. Для сокращения

этого срока можно изменить частотный масштаб стендового режима нагружения.

Известно, что частота нагружения влияет на усталостные характеристики материала. С повышением частоты нагружения возрастает величина предела выносливости. Однако при увеличении частоты нагружения до 100 Гц предел выносливости увеличивается не более чем на 5%. Исходя из этого, а также из энергетических возможностей применяемого испытательного оборудования есть возможность ускорения усталостных испытаний в указанных выше пределах.

Одним из важных вопросов методики проведения усталостных испытаний является обоснование схемы нагружения образцов на испытательном стенде. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы условия нагружения испытываемых образцов возможно ближе соответствовали действительным условиям нагружения в эксплуатации. Однако это не всегда может быть достигнуто, поскольку существующие испытательные средства позволяют, как правило, осуществлять нагружения только в одном направлении, в то время как в реальных условиях на деталь действуют нагрузки в различных направлениях. В связи с этим при выборе схемы нагружения необходимо учитывать вид нагрузки, наибольшее значение в суммарном напряженном состоянии.

Изучение явления усталости в настоящее время почти полностью базируется на эксперименте. Экспериментальные исследования усталостной прочности материалов и конструкций проводят при переменных напряжениях, представляющих собой периодическую (циклическую) функцию.

Цикл напряжений – совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период процесса их изменения.

Напряжения цикла $\sigma,\ \tau$ могут быть выражены уравнениями и графически (рисунок 15).

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a f(;\tau = \tau_m + \tau_a f(; \qquad (112)$$

Закономерности и изменения напряжения могут быть самыми разнообразными, они характеризуются формой кривой изменения напряжения, ее положением относительно оси

абсцисс, частотой повторений цикла, а также максимальными и минимальными напряжениями.

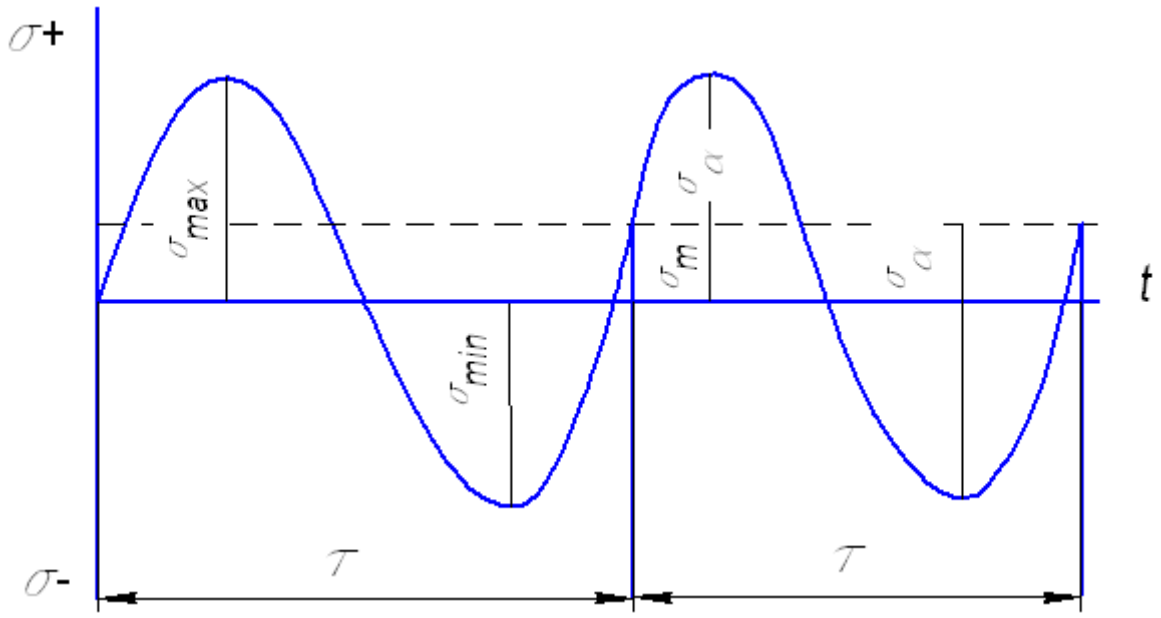


Рисунок 15 – Цикл напряжений

Максимальное напряжением цикла – наибольшее по алгебраической величине напряжение цикла:

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \tag{113}$$

где σ_m – среднее напряжение цикла;

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \tag{114}$$

амплитуда цикла σ_a:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \tag{115}$$

Минимальное напряжение цикла – наименьшее по алгебраической величине напряжение цикла:

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a. \tag{116}$$

Наиболее простым и весьма распространенным при исследованиях является гармонический цикл, изменение напряжений при котором протекает по синусоидальному

закону. Гармонические циклы подразделяются на симметричные, асимметричные и пульсирующие.

Одной из наиболее важных характеристик симметричного цикла является максимальное напряжение. Чем больше максимальное напряжение, тем при меньшем числе циклов происходит разрушение образца.

Усталостная прочность, характеризующая выносливость материала, определяется числом циклов, которые выдержал образец до разрушения при определенном уровне напряжений. Наибольшее значение максимального напряжения, при котором не происходит усталостного разрушения после неограниченно большого числа напряжений, называется пределом выносливости.

Номинальное напряжение – напряжение, вычисленное по формулам сопротивления материалов без учета концентрации напряжений, остаточных напряжений в процессе деформирования:

при изгибе:

$$\sigma_н = \frac{\mathrm{M}_u}{W_э}, \qquad (117)$$

где Mu – изгибающий момент и расчетном соединении, Нмм; $Wэ$ – осевой момент сопротивления расчетного сечения образца, мм^2;

при растяжении и сжатии:

$$\sigma_u = \frac{P}{F}, \qquad (118)$$

где P – осевая сила (нагрузка), приложенная к образцу, Н; F – площадь расчетного поперечного сечения образца, мм^2;

при кручении:

$$\tau_n = \frac{M_k}{W_p}, \qquad (119)$$

где Mk – крутящий момент в расчетном сечении образца, Нмм; Wp – полярный момент сопротивления расчетного сечения образца, см^2.

Наиболее распространенная схема нагружения при усталостных испытаниях – изгиб. Особенно проста и чаще всего применяется схема чистого изгиба образца при вращении (машина МУИ-6000). Нагрузка здесь прилагается в двух точках, чтобы обеспечить постоянство изгибающего момента на всей рабочей длине образца.

Часто применяют круговой изгиб консольно закрепленного образца (машина УКИ-10М). Для испытаний в условиях циклического растяжения - сжатия использует гидропульсационные и резонансные машины.

Усталостная прочность обычно выражается кривой усталости, которая представляет собой зависимость числа N циклов напряжений до разрушения от амплитуды цикла σ_a, (при σ_m = const) или от максимального напряжения цикла σmax (при $\sigma_{\min}$ = const). Кривые усталости материалов строятся в координатах N, σ, $1/N$, lnN, σ, или lnN, $ln\sigma$ по результатам испытаний серии одинаковых образцов (обычно не менее 8-10) из данного материала.

Подобным образом строят кривые усталости и для натурных деталей и конструкций.

Во многих случаях (например, для ряда сталей) кривая усталости имеет асимптотический характер. База испытаний для определения предела выносливости должна быть 10...106 циклов. Опыты показывают, что образцы из черных металлов, выдержавшие 107 циклов напряжений, обычно не разрушаются и при дальнейших испытаниях.

В этих случаях вводится понятие условного предела выносливости, т.е. предела, определяемого наибольшим по абсолютной величине напряжением цикла, при котором не наступает разрушение после приложения заданного числа циклов.

Основным критерием разрушения при определении пределов выносливости и построении кривых усталости является полное разрушение образца.

Механизм усталостного разрушения упрощенно можно представить в следующем виде. При действии переменных напряжений возникают необратимые субмикроскопические и микроскопические изменения в структуре металла, приводящие

к возникновению трещин в области структурных несовершенств (дефектов), где имеются локальные перенапряжения материала. При определенном уровне напряжений образовавшиеся трещины развиваются, увеличение числа и размеров трещин постепенно уменьшает сечение полноценного материала. Концы каждой трещины также являются зонами действия повышенных напряжений, в которых образуются новые трещины. Происходит распространение трещин на все сечение детали.

На усталостную прочность оказывают влияние следующие факторы.

1. Концентрация напряжений, которые можно объединить в группы:

а) геометрические факторы – надрезы (отверстия, выточки, канавки, резьба и т.д.), места сопряжения галтелями, в которых резко изменяется поперечное сечение образца или детали, и др.;

б) технологические факторы – наличие дефектов на поверхности детали, вызванных механической или химической обработкой;

в) металлургические факторы – присутствие в металле вторичных фаз, включений, внутренних дефектов (поры, трещины и пр.);

г) эксплуатационные факторы – приложение сосредоточенных сил (например, контактные напряжения в зубьях зубчатых колес, в подшипниках и т.д.).

2. Влияние микрогеометрии поверхности на прочность металла при действии статических и циклических нагрузок различно.

При действии циклических нагрузок повышением только класса чистоты поверхности сопротивление усталости металлов можно увеличить в несколько раз. Неровности, образующиеся на поверхности, являются эффективными концентраторами напряжения и служат одной из причин снижения циклической прочности. Острая царапина глубиной 0,1 мм, нанесенная абразивом, приводит к снижению предела усталости до 40%. Разрушение начинается с поверхностных слоев, поэтому их исходное состояние оказывает большое влияние на циклическую прочность.

Структура металла в поверхностных и нижележащих слоях

значительно различается. Технологическая обработка изменяет состояние в поверхностных слоях металла, приводит к пластической деформации, старению; с увеличением степени наклепа предел усталости повышается.

Остаточные напряжения могут быть сжимающими и растягивающими. Сжимающие чаще всего способствуют повышению циклической прочности металлов, растягивающие приводят к снижению сопротивляемости усталости, особенно при наличии концентраторов напряжений.

3. Изменение частоты приложения нагрузки в интервале 500-60000 цикл/мин не приводит к существенному изменению величины физического предела усталости.

Изменения частоты от 60000 цикл/мин и выше вызывают вначале повышение предела усталости, а затем его снижение. Критическая величина частоты нагружения, при которой наступает снижение предела усталости, зависит от физических свойств металла.

4. Циклическая прочность так же, как и статическая зависит от химического состава материала и его структуры.

У большинства металлов и сплавов предел усталости приблизительно линейно увеличивается с ростом предела прочности. При легировании низко- и среднеуглеродистых сталей *Мп, Ni, Cr, Mo, V, P* и другими циклическая прочность увеличивается. Повышение содержания для низко- и среднеуглеродистых сталей увеличивает циклическую прочность.

Неметаллические включения (окислы, сульфиды, силикаты и пр.), являющиеся металлургическими, снижают статическую и циклическую прочность металлов. Главная причина, обусловливающая снижение циклической прочности, – концентрация напряжения у включений.

При внутризеренном разрушении границы зерен играют роль барьеров, препятствующих распространению трещин; мелкозернистая структура оказывает более высокое сопротивление усталости, чем крупнозернистая.

5. Зависимость механических свойств материала от размера образца или детали получила название масштабного фактора. Влияние размера образцов от критерия прочности у

разных металлов проявляется по-разному и зависит от многих факторов.

При действии циклических напряжений установлены следующие закономерности влияния абсолютных размеров образца и концентрации напряжений на сопротивляемость усталости металлов:

а) предел усталости с увеличением размера детали снижается, причем степень проявления масштабного фактора зависит от формы изделия (наличия концентраторов напряжений); наиболее интенсивное снижение предела усталости, как правило, наблюдается при увеличении диаметра образцов от 5 до 25-50 мм, а затем при дальнейшем увеличении размера образцов это снижение затухает;

б) масштабный фактор усиливается с увеличением прочности стали и при увеличении неоднородности материала;

в) эффективный коэффициент концентрации напряжений возрастает с увеличением размера образца;

г) чувствительность к масштабному фактору увеличивается с увеличением неоднородности распределения напряжений.

6. Среды, окружающие деформированный металл, по-разному действуют на механические характеристики. Сухой воздух не снижает прочность; смазочные материалы снижают, особенно сильно снижают прочность химически активные среды.

7. В узлах машин часто циклической нагрузке подвергаются сопряженные детали. Если между соприкасающимися поверхностями деталей в процессе циклического нагружения имеет место трение, то в местах контакта поверхностные слои металла разрушаются. Наличие контактного трения при циклическом нагружении приводит к снижению циклической прочности.

Коленчатые валы, коленчатые оси, поворотные цапфы, полуоси при эксплуатации подвергаются воздействиям динамических нагрузок, имеющих переменный (циклический) характер, как по знаку, так и по времени их приложения и действия. Основная причина разрушения деталей при указанных нагрузках объясняется усталостной прочностью материала, из которого они выполнены, т.е. появлением трещин усталости, вызывающих хрупкое, мгновенное разрушение без отсутствия деформации в зоне разрушения.

При испытании на машине У-20М сталь 45 в нормализованном и закаленном состоянии с нагревом ТВЧ обеспечивает предел выносливости соответственно 220-256 и 510 Н/ см^2. Наплавка по стали 45 при всех видах вызывает снижение сопротивления усталости до 50% (таблица 18), особенно при механизированных наплавках в потоке воздуха (140 Н/ см^2), плазменной дугой (150-186 Н/ см^2), порошковыми проволоками (240-280 Н/ см^2), в углекислом газе и водяном пару (160-190 Н/ см^2).

Таблица 18 – Влияние видов наплавки на усталостную прочность

Вид наплавки, материалы и защитные среды	Предел выносливости, Н/ см^2
30ХГСА + флюс АН-348А	270
30ХТСА + газ CO_2	160-170
30ХГСА + водяной пар	190
30ХГСА + воздушный поток	140

Принципы конструирования, обеспечивающие получение надежных систем

Общие принципы обеспечения надежности

Роль конструкторской службы является основной в создании и апробировании конструкций, которым присуща требуемая надежность. При конструировании часто упускаются из виду очевидные истины, обеспечивающие надежность, поэтому имеет смысл привести некоторые основные положения.

1. Конструктор разрабатывает конструкцию и отвечает за обеспечение всех требуемых характеристик, включая надежность.

2. Конструкция каждого изделия обладает присущей ей потенциальной надежностью.

3. Потенциальная надежность конструкции может быть реализована только при изготовлении изделия в полном соответствии с конструктивными требованиями. Однако полностью реализовать потенциальную надежность удается редко, так как условия производства, испытаний, хранения и

эксплуатации часто отличаются от расчетных. В результате этого достигнутая или фактическая надежность бывает меньше потенциальной.

4. Разработка любого сложного изделия должна обеспечивать его потенциальную надежность, чтобы можно было передать потребителю изделия с заданной или требуемой фактической надежностью.

5. Персонал службы надежности по отношению к конструктору должен проводить объективную независимую политику «контроля и балансирования», но при этом с конструктора не должна сниматься ответственность за обеспечение надежности.

Задача обеспечения максимальной потенциальной надежности в процессе разработки решается при наличии не только сильной конструкторской службы, но также и компетентной службы надежности.

Обеспечение в сложной системе высокой, внутренне присущей конструкции, надежности может оказаться дорогостоящим и потребовать больших затрат времени, хотя затруднения с выпуском продукции и проблемы, возникающие во время эксплуатации в связи с необходимостью обеспечения и поддержания требуемого фактического уровня надежности, могут вызвать еще большие затраты.

Рассмотрим вопрос о цене ненадежности. При уменьшении достигнутой надежности оперативной ракетной системы на 10% для обеспечения одной и той же степени поражения цели потребуется увеличение, по меньшей мере, на 10% фактического числа боевых ракет. Для этих ракет нужны дополнительные пусковые площадки (шахты или подводные лодки), испытательная аппаратура, оборудование для пуска, обслуживающий персонал и вспомогательное оборудование, что связано с большими затратами средств и времени.

Требования к надежности определяются результатами сравнительного анализа цены надежности и цены ненадежности. Очевидно, что принятое решение должно быть согласовано с заказчиком, так как, в конечном счете, он покрывает все расходы.

Роль этапа конструирования в обеспечении надежности

Для областей, характеризующихся быстрым техническим прогрессом, например при разработке аппаратуры космической техники вообще и радиоэлектронной аппаратуры в частности, существенным является наличие сильной компетентной конструкторской службы. В структуре фирм, работающих в этих направлениях, конструкторская служба обычно считается определяющей.

Этап конструирования имеет также большое значение для изготовителей дорогостоящей продукции (автомобилей, технологического оборудования, станков) и во многих других аналогичных областях производства. Этап конструирования играет важную роль во всех промышленных областях, хотя имеет меньшее значение в фирмах, выпускающих простые изделия или изделия, характеризующиеся стабильной апробированной конструкцией.

Конкретные *действия в начале разработки обычно начинаются* с организации работ по исследованиям новых конструкторских концепций. В связи с этим целесообразно привести здесь некоторые определения, касающиеся конструирования.

Исследования – научная или инженерная деятельность фирмы, связанная с разработкой нового изделия или новых важных методов конструирования существующих изделий.

Разработка – инженерная деятельность фирмы по внедрению и осуществлению исследовательской идеи. Иногда разработка сочетается с исследованиями, а в других случаях – с конструированием.

Конструирование – инженерная функция, заключающаяся в применении конструкторских методов к решению конкретных задач. В результате выполнения этой функции выпускаются чертежи и технические условия на комплектующие изделия, используемые в этой программе.

Конструкторская служба ставит перед собой задачу создания конструкций со следующими характеристиками:

Функциональная пригодность. Конструкция при воплощении ее в изделие должна обеспечивать удовлетворительное выполнение функций, для которых она предназначена.

Надежность. Конструкция, воплощенная в изделие, должна обеспечивать выполнение заданных функций не только сразу после изготовления и при благоприятных условиях, но также в течение требуемого периода времени в установленных пределах окружающих условий. Если предусмотрена возможность ухода и обслуживания, то это должно быть учтено в конструкции.

Технологичность. Конструкция должна обеспечивать экономичное изготовление изделия имеющимися производственными средствами и силами организаций-смежников (поставщиков), которых предполагается привлечь к участию в работе.

Своевременность. Деталирование чертежей должно быть завершено, а сами чертежи выпущены в установленные графиком сроки.

Конкурентоспособность. Конструкция должна находить сбыт. На возможность сбыта, кроме упомянутых выше факторов, оказывают влияние стоимость, внешний вид и многие другие факторы.

Предполагается, что по возможности конструктор будет применять общепринятые методы конструирования. Работа конструкторов по своему характеру является творческой; поэтому им часто бывает трудно противостоять желанию применить что-либо новое, несмотря на то, что существует апробированный метод, обеспечивающий требуемую эффективность и надежность. Хорошо известна восприимчивость конструкторов по отношению к усилиям инженеров рекламного отдела, поставщиков деталей и узлов, пропагандирующих достоинства своих новых изделий. Одна из важных обязанностей руководства конструкторскими работами заключается в создании системы, стимулирующей использование конструктором апробированных конструкций вместо неапробированных.

В связи с тем, что часто оказывается невозможным максимально выполнить весь комплекс иногда противоречивых требований, конструктору приходится принимать компромиссные решения. Задавая необычно жесткие допуски или внося в спецификацию какой-либо «экзотический» материал, он может добиться повышения надежности ценой

ухудшения технологичности. Отказавшись от полного цикла испытаний конструкции при наихудших сочетаниях условий окружающей среды и воздействии старения, конструктор может пойти на риск и сконструировать изделие с пониженной надежностью, но при этом он может выпустить чертежи в установленные планом сроки. Некоторые из этих компромиссных решений почти неизбежны.

Задачи службы надежности на этапе конструирования

Понятие «техническое конструирование» охватывает различные виды деятельности, общая цель которых заключается в выпуске комплекта конструкторской документации (чертежи, технические условия, методики, программы контрольных испытаний), которая содержит информацию, позволяющую компетентному производственному персоналу выпустить изделия, удовлетворяющие всем конструктивным требованиям.

В зависимости от характера изделия, предполагаемых способов его использования, требований заказчика и условий практической деятельности фирмы комплект конструкторской документации может быть простым, как, например, эскизный документ, или сложным, как, например, система связанных между собой и контролируемых военным ведомством чертежей, технических условий, методик, программ заводских испытаний, планов заводского контроля, инструкций по эксплуатации с обеспечением формальных каналов обратной связи для получения данных об отказах, наблюдавшихся в процессе эксплуатации и заменах элементов.

Во многих случаях конструктору приходится иметь дело с изделиями на этапах разработки экспериментальных макетов и опытных образцов и испытаний. Он должен также планировать выполнение программ испытаний при различных условиях окружающей среды и предельных воздействиях, установленных техническими условиями.

Для инженера в области надежности важно понимание целесообразной последовательности и объема работ, выполняемых разработчиком после получения им задания. Такими являются девять видов работ.

1. Разработка или выбор одного или более вариантов структурных схем конструкции.

2. Анализ выполнимости различных возможных структурных схем, который может быть проведен на основе опыта, с помощью моделирования и теоретического анализа, лабораторного экспериментирования и испытаний, создания макетов или сочетания указанных методов.

3. Выбор структурной схемы, базирующийся на результатах анализа возможных вариантов и сопоставлении вероятностей выполнения с помощью каждого из этих вариантов всех заданных требований. Такой выбор связан с необходимостью серьезного «надежностного» анализа конструкции. Обычно он требует одобрения вышестоящего руководителя.

4. Распределение, если это признано необходимым, требований к надежности по всей конструкции вплоть до уровня отдельных деталей.

5. Подготовка предварительных чертежей и технических условий на изготовление опытных образцов. Работа над такими предварительными чертежами и техническими условиями требует серьезного «надежностного» анализа конструкции.

6. Выпуск предварительных чертежей и технических условий на изготовление установочной серии изделий, предназначенной для проверки выполнимости всех конструкторских решений при производстве изделий, оценочных автономных испытаний и комплексных испытаний совместно с другими элементами системы.

7. Выработка требований к квалификационным испытаниям и участие в выработке требований к заводским испытаниям и контролю.

8. Проведение испытаний опытных образцов, квалификационных испытаний, а также при необходимости коррекций схемной и конструкторской документации.

9. Выпуск законченного комплекта конструкторских документов после одобрения всей разработки с точки зрения надежности и других требований.

После выпуска комплекта конструкторской документации

конструктор продолжает решать ряд задач. Две из них – авторский контроль над реализацией конструкции и контроль над внесением изменений в конструкцию – тесно связаны между собой. Все предложения о внесении изменений в чертежи должны быть тщательно рассмотрены с точки зрения их влияния на потенциальную надежность, а также на другие характеристики. Желательно, чтобы в некоторый момент проект оказался в «замороженном» состоянии, после чего вносить какие-либо изменения по улучшению конструкции запрещается.

Авторский контроль над реализацией конструкции связан с контролем выполнения требований при изготовлении каждого серийного образца, производственной партии или изделия этого типа. Любое отклонение в размерах, электрических, механических и других характеристиках между изготовленным и спроектированным изделиями должно быть обнаружено, зафиксировано и подвергнуто анализу в целях принятия совместных мер службами конструирования и надежности (а в случае необходимости и заказчиком).

Влияние требований надежности на конструирование

Требования, задачи и цели в отношении надежности формулируются заказчиком или вытекают из практики конкурентной борьбы. Четкую и определенную линию в отношении требований к надежности обычно ведут правительственные учреждения. Высокие требования к надежности предъявляют к своим поставщикам также крупные заказчики таких промышленных отраслей, как автомобильная и гражданская авиация.

Требования в отношении надежности для потребительских товаров и промышленных изделий, поставляемых различным потребителям, определяются изготовителем на основе изучения реакции потребителя и анализа практики конкурирующих фирм. Конечно, фирма может быть вытеснена с рынка из-за установления чрезмерно высокой цены, если она будет добиваться нереально высокой надежности. Однако значительно большее число фирм оказывалось в затруднении из-за неприемлемо низкой надежности их продукции. Требования к надежности независимо от того, предписаны ли они или выработаны самой организацией, не являются неприкосновенными и должны периодически подвергаться пересмотру. Пересмотр необходимости и обоснованности требований к конструкции (включая надежность) является основным элементом работы по техническому совершенствованию изделий. Отказ на первых стадиях выполнения программы от недиктуемых необходимостью требований в области надежности может дать экономию времени, усилий и средств, а также увеличить ресурсы, которые могут быть сконцентрированы для решения других важных конструктивных проблем.

При выполнении сложного проекта необходимо разбить все общие требования в области надежности, цели и задачи на отдельные частные цели и задачи, относящиеся к элементам проекта. Такое распределение целей и задач обычно выполняется на уровне комплексного руководства проектом или подготавливается для него службой надежности. Наименее жесткие возможные требования к надежности должны

предъявляться к конструктивным элементам большой сложности или к тем элементам, в которых используются новейшие достижения технического прогресса. К элементам, являющимся относительно простыми, в которых используются хорошо известные и апробированные конструктивные принципы, должны предъявляться наиболее жесткие требования по надежности.

Указанное распределение требований по надежности часто пересматривается ответственным руководством проекта. На конструкцию могут быть наложены некоторые специальные ограничения в отношении надежности, составляющие часть конструктивных требований. Может быть запрещено применение определенных материалов, деталей иди методов, например:

- натуральных или синтетических материалов с недопустимыми характеристиками (горючесть, газовыделение и др.);
- электронных элементов, характеристики которых считаются неудовлетворительными при использовании в данной конструкции (например, реле, электролитические конденсаторы);
- жидких ракетных топлив для баллистических снарядов, предназначенных для использования на подводных лодках;
- олова, цинка и некоторых других металлов в электронных приборах в связи с образованием этими металлами кристаллических «усиков», которые могут вызвать отказы.

Служба надежности может также потребовать от конструктора следовать установившейся практике в области надежности, применять определенные материалы и детали и использовать некоторые конструктивные методы, например:

- применять апробированные полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды и т. п.) вместо электровакуумных приборов;
- предусматривать резервирование в некоторых частях схемы;
- использовать некоторые апробированные на практике методы конструирования при соединении неоднородных металлов для защиты от электролитических коррозионных процессов, которые могут возникнуть при определенных окружающих условиях;
- облегчать режимы работы электронных элементов в

целях уменьшения числа отказов и повышения срока службы элементов.

Выраженные количественно требования, задачи и цели в отношении надежности составляют часть основных конструкторских заданий.

Практические методы конструирования надежных систем

В каждой отрасли техники используются свои практические методы конструирования, которые являются для нее характерными.

Конструирование радиоэлектронных систем. Конструирование радиоэлектронных систем состоит, как правило, в соединении в определенном порядке стандартных электронных элементов.

В связи с тем, что конструктор схемы практически не может быть специалистом по всем типам схемных элементов, которые ему приходится применять, обычно создается специальная группа специалистов по комплектующим деталям. Эта группа специалистов обычно составляет часть службы надежности. Ее функция заключается в контроле, связанном как с разрешением к применению элементов, так и с использованием разрешенных к применению элементов в нестандартных условиях и режимах. Такой порядок объясняется необходимостью предотвратить использование в перенапряженном режиме апробированных деталей. Иногда, стремясь уменьшить массу и габаритные размеры устройства, конструктор допускает перенапряженные режимы. Если требуется обеспечить высокую надежность, при конструировании обычно стремятся облегчить режимы работы электронных элементов приблизительно на 50%.

Конструкторы электронных систем при разработке функциональных схем и схем соединений обычно полагаются на специалистов по компоновке, при получении экспертных рекомендаций по проблемам обеспечения требуемого теплового режима на лиц, занимающихся тепловыми расчетами, и при получении рекомендаций по заливке, пайке, сварке и другим технологическим процессам – на специалистов по материалам и процессам.

Расчет силовых конструкций. Конструкторам самолетов,

управляемых снарядов, искусственных спутников не разрешается прибегать (из-за ограничений в габаритных размерах и массе) к утяжелению конструкции, обычно допускаемому конструкторами неподвижных сооружений или изделий, предназначенных для передвижения по земле. Конструкторы космических аппаратов работают с запасами прочности и для подтверждения правильности своих конструктивных расчетов в значительной степени полагаются на испытания с доведением образцов до разрушения. Для механических деталей несколько в меньшей степени применяются такие же методы контроля, как и описанные ранее для электронных деталей.

Конструирование гидравлических и пневматических систем. Перед конструкторами гидравлических и пневматических систем возникает несколько общих проблем. Они обычно имеют дело с высокими давлениями и должны предусматривать в конструкциях меры безопасности против взрывов. Большое беспокойство вызывает у них проблема герметичности, всегда нужно иметь в виду возможность загрязнения и закупорки трубопроводов. При разработке таких систем для летательных аппаратов конструкторы должны тщательно анализировать технические решения, с тем, чтобы обеспечивать необходимые меры безопасности, удовлетворяя одновременно установленным для такой аппаратуры требованиям в отношении объема и массы.

Конструирование механических элементов. В конструировании функциональных механических элементов накоплен значительно больший опыт. Конструкции многих функциональных механических элементов представляют собой модификацию или развитие ранее апробированных конструкций. Это облегчает принятие технических решений. Если необходимо использовать стандартные функциональные механические детали (например, шарикоподшипники) в условиях, существенно отличных от стандартных, то необходимо воспользоваться помощью специалистов по деталям и элементам.

Методы конструирования, обеспечивающие получение высокой надежности

Одним из способов повышения надежности, когда это допустимо с точки зрения ограничений в массе, объеме и стоимости, является создание больших запасов прочности конструкции. При расчете ответственных силовых конструкций это означает, например, что нужно рассчитать конструкцию на 4500 кг, когда максимальное усилие по техническим условиям составляет 450 кг. При конструировании радиоэлектронной аппаратуры режимы работы электронных элементов облегчаются до такой степени, что обеспечивается их использование на 10... 15% номинальных значений параметров. При конструировании гидравлических или пневматических систем это означает, например, конструирование сосуда высокого давления, рассчитанного на удельное давление 70 кг/см^2, при установленном максимальном удельном давлении 7 кг/см^2.

Для конструктора, стремящегося обеспечить высокую надежность, полезными оказываются два подхода – упрощение и стандартизация. Чем проще конструкция, тем выше внутренне присущая ей надежность. Уменьшение количества деталей или числа различных типов используемых деталей представляет собой очевидный метод повышения потенциальной надежности электронного устройства. Стандартные элементы и схемы обычно проходят тщательную приработку, и вероятность появления каких-либо неприятных неожиданностей при их использовании очень мала. Необходимо иметь в виду, что каждое затейливое устройство все же можно заставить функционировать; однако чем выше сложность конструкции, тем обычно меньше ее надежность.

Конструктор должен проявлять интерес к факторам инженерной психологии. Следует заботиться о том, чтобы неправильная сборка или неправильное использование созданной конструкции были бы затруднительными. По возможности длина кабелей должна выбираться таким образом, чтобы можно было соединить с соответствующим разъемом только нужный кабель; разъемы должны отличаться по размерам, чтобы подходил только разъем соответствующего кабеля. Если поставлено условие возможности замены функционального узла, то проблемы,

связанные с удалением и заменой его малоквалифицированным персоналом в эксплуатационных условиях, должны быть тщательно рассмотрены и решены оптимальным способом. В случаях, когда можно уронить болт крепления, гайку или винт в важную или недоступную часть устройства, вероятность повреждения конструкции (при прочих равных условиях) значительно возрастает.

Большое значение для повышения надежности имеют обеспечиваемые конструкцией возможности проведения производственных и эксплуатационных испытаний и контроля. Разработчик функциональной схемы по возможности должен так выбирать принцип действия и схему устройства и его узлов, чтобы они могли быть подвергнуты полной неразрушающей функциональной проверке. Например, электрический выключатель может быть проверен в работе, тогда как такая же проверка предохранителя приводит к его разрушению. В данном случае преимущество «испытуемости» должно быть взвешено и сопоставлено с вероятно более высокой надежностью предохранителя. Обмотка электромагнита может быть повторно много раз проверена в работе; пирозапал является устройством одноразового действия. Очень важной характеристикой высоконадежной конструкции является также возможность проконтролировать ее основные размеры, отделку поверхностей и другие нефункциональные особенности.

Необходимо отметить, что в отношении частой оперативной проверки сложных систем оружия существуют две школы. Так называемая школа «деревянных ракет» придерживается взгляда о необходимости проведения лишь очень редких проверок или исключения их, пока система оружия работоспособна. Вторая школа выступает за регулярные и частые функциональные проверки работоспособности системы оружия. Исследователи, принадлежащие к первой школе, исходят из того, что «проверка влечет за собой износ» и надежность системы оружия заметно понижается при каждой проверке. Фактически на практике прибегают к компромиссному решению, выражающемуся в проведении нечастых, но регулярных функциональных проверок по сокращенной программе.

Если конструкция требует применения специальных технологических процессов или необычных производственных методов, то эти требования должны быть четко указаны в чертежах и технических условиях. Кроме того, в них должны быть приведены предупредительные сведения относительно организации системы контроля производственных процессов и качества, с тем, чтобы были сведены к минимуму возможность неблагоприятного влияния на надежность и качество особенностей характеристик оборудования, способов его установки и степени подготовки персонала. В качестве примера можно указать на конструкцию, которая должна быть изготовлена в чистом помещении при определенных условиях работы. В случаях, когда производственная организация этими условиями не располагает, они должны быть созданы либо должны быть приняты предупредительные меры, позволяющие устранить вредное влияние загрязненности помещения.

Обычно значительно легче сконструировать аппаратуру для благоприятных окружающих условий, чем для жестких (предельных) условий. Одним из способов повышения надежности устройства является создание облегченных условий. Этого можно добиться путем обеспечения термостатирования или температурного контроля, ослабления ударных нагрузок с помощью амортизации, уменьшения влажности при транспортировке, хранении и эксплуатации, применением в замкнутом объеме влагопоглотителей и т.п. Несмотря на то, что изменение окружающих условий (обычно путем применения специальных контейнеров, в которых поддерживаются требуемые условия) обходится очень дорого и связано с дополнительными трудностями, тем не менее, оно представляет собой выход из положения в тех случаях, когда невозможно найти приемлемое конструктивное решение для обеспечения надежности при работе во всем диапазоне предельных условий.

Одним из важных методов, используемых для достижения высокой конструктивной надежности, является резервирование, хотя этот метод обладает определенными ограничениями. Легко убедиться в том, что выполнение некоторой функции с помощью одной из двух функциональных цепей имеет преимущество в отношении обеспечения

надежности по сравнению со случаем работы только одной цепи. Иногда автоматическое функциональное устройство дублируется с помощью ручного устройства (при участии оператора). Резервирование обеспечивается также применением нескольких двигателей на морских судах и самолетах. Для увеличения надежности систем может быть принято решение об использовании обслуживающего персонала в дополнение к полностью автоматизированным устройствам.

Следует иметь в виду, что резервирование как метод конструирования имеет определенные ограничения и не может рассматриваться как панацея от всех бед. Некоторые из этих ограничений заключаются в следующем:

1) ограничения в габаритных размерах и массе могут привести к двум дотированным схемам (или другим функциональным устройствам), в которых используются малогабаритные, менее надежные элементы, размещаемые в располагаемом объеме. При этих условиях надежность резервированной системы может оказаться даже меньше, чем надежность нерезервируемой системы;

2) удары, вибрации или изменения температуры, которые могут вызвать выход из строя одной схемы или системы, вероятно, вызовут выход из строя обеих (резервированных) систем. При таких условиях необходимо лучше направить усилия конструктора на защиту от перегрева, ослабление вибраций и ударов или на другую защиту схемы или системы от воздействия окружающих условий;

3) не всегда то, что кажется резервированием, оказывается им на самом деле. Так, например, две трубы, используемые для параллельной передачи жидкости (с необходимыми контрольными клапанами и т.п.), являются полностью резервированными только в том случае, если каждая труба в отдельности рассчитана на максимально требуемый поток жидкости. Можно привести и другой пример. Двухмоторный самолет, который при полете с одним двигателем не может обеспечить достижение требуемых высоты и скорости полета, теоретически менее надежен при полете над водной поверхностью, чем одномоторный самолет. Это объясняется тем, что вероятность отказа двигателя у

двухмоторного самолета в два раза больше, чем у одномоторного.

Другой метод конструирования, направленный на повышение надежности, заключается в преднамеренном решении не рассчитывать конструкцию на самые худшие рабочие условия. Приняв такое решение, конструктор может использовать менее сложную конструкцию, обладающую более высокой надежностью при всех, кроме наихудших возможных сочетаний, условиях. Вероятность столкнуться с самыми худшими сочетаниями условий окружающей среды статистически весьма мала, и поэтому конструктор может ожидать выигрыша в надежности.

Наконец, эффективный метод повышения надежности заключается в том, чтобы проявлять неизменное глубокое внимание ко всем случаям отказов и неувязкам в конструкции, сведения о которых поступают из отчетов о разработке, конструктивного анализа, приказов на изменения в чертежах (от службы контроля качества продукции и службы технической связи), формальных программ испытаний, отчетов о неисправностях и отказах при эксплуатации и материалов исследования причин отказов. Оперативные эффективные корректировочные меры могут в значительной степени повысить надежность.

Таким образом, существует несколько методов, с помощью которых можно повысить конструктивную надежность. В каждом случае эти методы необходимо всесторонне оценить, выяснить ограничения, влияющие на конкретную разрабатываемую конструкцию. Конструктивные методы повышения надежности предусматривают: создание запасов прочности конструкции, облегчение режимов работы элементов, упрощение конструкции, использование стандартных деталей и узлов, учет факторов инженерной психологии, обеспечение ремонтопригодности и возможности проведения текущих испытаний и контроля, меры, позволяющие успешно выполнить специальные технологические процессы, обеспечение благоприятных окружающих условий работы устройства, обоснованное использование резервирования и, наконец, учет материалов, содержащихся в оперативных отчетах по разработке, и принятие необходимых корректировочных мер для устранения

вероятных причин ненадежной работы устройства.

Анализ надежности конструкции

Анализ надежности конструкции включает в себя целый ряд функций, выполняемых службой надежности. Наиболее важными из них являются анализ конструкции, связанный с прогнозированием надежности, и составление отчета о ходе разработки с точки зрения надежности.

Анализ, связанный с прогнозированием надежности, проводится для оценки потенциальной, внутренне присущей, конструкции надежности. К нему приступают, как только появляются конструктивные варианты. По мере совершенствования конструкции отчетные материалы обновляются. Типичный отчет по анализу и прогнозированию надежности функционального электронного узла на начальном этапе конструирования может содержать следующие разделы.

1. *Введение.* Во введении дается физическое и функциональное описание устройства. Объясняется практическое применение устройства с использованием графических иллюстраций.

2. *Сводка основных выводов и рекомендаций.* Это одна из основных частей отчета. Целью анализа надежности является определение тех мест конструкции, которые нуждаются в улучшении, и предложение соответствующих корректировочных мер.

3. *Блок-схема надежности.* Схема показывает роль разрабатываемого устройства при функционировании его в составе всей системы, а также основные функции самого устройства. В блок-схеме должны быть отражены все случаи схемного и функционального резервирования.

4. *Оценка надежности системы.* Анализ должен быть направлен на получение количественной оценки надежности устройства. В качестве исходных материалов используются данные о требуемой продолжительности работы устройства, интенсивности износовых отказов, характеристики старения и надежности нестандартных деталей.

5. *Надежность схемных элементов.* В этом разделе отчета указываются источники данных по интенсивностям отказов схемных элементов, приводятся данные для конкретных элементов разрабатываемого устройства и

допущения, принятые при оценках интенсивностей отказов элементов. Кроме того, здесь может приводиться информация, необходимая для обоснования выбора типов элементов и режимов их использования, сводка данных об анализе механических и других нагрузок на элементы изделия, описание используемого метода определения надежности элементов одноразового действия, перечни изделий, которые могут работать только в течение определенного календарного времени, указания по методике приработки и тренировки элементов, а также указания по входному контролю элементов внешней поставки.

6. *Анализ видов отказов.* Идентифицируются и описываются все вероятные первичные виды отказов, а также оценивается возможное влияние каждого из них на характеристики системы. Делаются замечания относительно предусмотренных в схеме и конструкции мер, направленных на предупреждение «цепных» отказов, т.е. отказов, которые в свою очередь вызывают новые отказы.

7. *Анализ надежности в процессе производства.* В этом разделе отчета описываются специальные меры и требования, необходимые для сохранения потенциальной надежности изделия в процессе производства. В него включаются требования по проверке чертежей, методы контроля за выполнением требований относительно производственных условий, например поддержания требуемой чистоты помещений, способы проверки выполнения технологических процессов, специальные требования и ограничения, связанные с испытаниями и контролем на разных стадиях производства, а также требования по обращению с изделием и упаковке.

8. *Анализ ремонтопригодности.* В этом разделе приводятся данные о методиках, предназначенных для обнаружения и устранения неисправностей, сведения о доступе к элементам с ограниченным сроком службы, требования к периодичности и объему профилактических осмотров, инструкции по обслуживанию и рекомендации по обеспечению запасными частями и материалами.

9. *Выводы и рекомендации.* В этом разделе приводится сводка всех рекомендаций, содержащихся в других разделах отчета, со ссылками на конкретные параграфы, в которых

имеется подробная информация.

Показатель надежности, предварительно рассчитанный для разрабатываемой конструкции, приобретает особую ценность при сравнении различных конструктивных концепций. Часто отчет об анализе и прогнозировании надежности является одним из основных источников описания проекта на ранней стадии конструирования наряду с циклограммами процесса функционирования, схемами, теорией процесса работы, указаниями о выполняемых функциях, прогнозируемыми видами отказов и подобной важной информации. Отчет с изложением материалов анализа и прогнозирования надежности вместе с информацией, заложенной в технической конструкторской документации, являются основными данными для суждения о качестве конструкции. Третьим основным источником данных служат составленные конструктором отчеты о ходе разработки с точки зрения надежности. По комплексным системам анализ конструкции нужно проводить, по крайней мере, три раза (на начальном, промежуточном и окончательном этапах разработки).

Анализ конструктивных вариантов на начальном этапе разработки потенциально влияет на конструкцию, а последующие промежуточные и окончательный анализы имеют относительно меньшее влияние. В случаях, когда это возможно, анализ конструкции в отношении надежности должен сочетаться с анализом конструкции с других точек зрения, например технологичности и ремонтопригодности. Это диктуется необходимостью свести к минимуму затраты рабочего времени конструктора и разрешить вопросы, связанные с противоречивыми рекомендациями. Далее приводятся положения отчета о ходе разработки:

- анализ требований к работе устройства;
- анализ требований к условиям окружающей среды;
- разрешение на применение апробированных деталей;
- анализ схем и прогнозирование надежности;
- меры по обеспечению виброустойчивости и ударостойкости;
- меры по обеспечению теплоотвода;
- правильное применение неоднородных металлов для сведения к минимуму коррозионных процессов;

- правильное применение органических материалов для уменьшения ограничений срока службы;

- исследование условий, способствующих образованию участков местного перегрева;

- сведение к минимуму требований по регулировкам и подгонкам отдельных устройств при сборке их в систему, а также требований по подгонке параметров элементов в процессе производства;

- меры по обеспечению возможности проведения испытаний и контроля;

- меры по обеспечению ремонтопригодности;

- анализ потенциальных видов отказов и их влияния на работоспособность системы.

Таким образом, анализ надежности конструкции представляет собой аналитический метод оценки или предсказания внутренне присущей конструкции надежности путем (в случае электронных устройств) выбора показателей надежности для схемных элементов, оценки влияния облегченных режимов работы, резервирования и других факторов. К анализу надежности конструкции необходимо приступать, как только появляются промежуточные варианты конструкции или разработанные схемы. Материалы анализа должны пересматриваться каждый раз после внесения значительных конструктивных изменений.

Анализ надежности конструкции можно рассматривать как мероприятие по контролю качества выполнения конструкторских работ в целях оценки и определения соответствия разработки основным требованиям и оправдавшим себя принципам и практическим методам конструирования. В этом смысле анализ надежности конструкции связан с качеством проекта (внутренне присущая надежность), как контроль и испытания в процессе производства связаны с качеством изготовления (соответствие конструктивным требованиям) изделия. Высокая внутренне присущая надежность является фундаментальным требованием, предъявляемым к изделиям, которые должны обладать высокой надежностью в эксплуатационных условиях.

К сожалению, конструкция с высокой внутренне присущей надежностью легко теряет заметную часть потенциальной

надежности вследствие некачественного контроля конструктивных параметров, небрежного контроля вносимых изменений и использования чертежей и технических условий, в которых содержится неоднозначно истолковываемая информация. Проведенный анализ конструкции передается персоналу технологов и изготовителей, а также аппарату контроля качества, которые должны осуществлять проверку качества и однозначности документации. Эта проверка вместе с постоянной проверкой выпускаемых чертежей, конструктивных изменений и системой авторского контроля над правильностью изготовления разработанной конструкции играет существенную роль в предотвращении ухудшения надежности конструкции, обладающей потенциально высоким уровнем надежности.

Функции службы надежности при разработке изделий

Существует несколько дополнительных мер по повышению надежности, которые в некоторой степени влияют на деятельность конструкторской организации.

Составление перечней схемных элементов с ограниченным календарным сроком службы. Эти элементы обычно ограничивают общий срок службы всей конструкции. Такие ограничения обусловливаются применением органических материалов (например, резины) или взрывчатых химических веществ. Очевидно, для элементов с ограниченным календарным сроком службы должны предусматриваться запасные части, поставку которых следует включать в планы материально-технического снабжения.

Составление перечней схемных элементов с ограниченным ресурсом работы. У этих функциональных элементов допускаемый срок службы выражается временем работы, числом рабочих циклов или числом включений, меньшими, чем это требуется при реальных условиях эксплуатации. Необходимые действия такие же, как в случае элементов с ограниченным календарным сроком службы.

Систематическое наблюдение за старением материалов. Оно осуществляется по программе детального

исследовательского анализа материалов, находившихся *длительное* время в рабочем состоянии под нагрузкой. Этот анализ имеет целью раннее обнаружение признаков зарождающихся отказов. Результаты систематического наблюдения за старением материалов поступают к конструкторам в форме рекомендаций.

Проверка однозначности конструкторской документации. В период между анализом конструкторских материалов с точки зрения надежности и детальной проверкой практически выполненных чертежей необходима проверка на надежность другого рода. Ее целью является подтверждение того, что замыслы конструктора ясно и полностью переданы техническому персоналу и контролерам, которые будут ими руководствоваться. Этот вид проверки известен под названием проверки на однозначность даваемых в конструкторских документах указаний. Особо тщательно при этом следует проверять требования, отраженные в технических условиях, и примечания к чертежам.

Надежность, обеспечиваемая в процессе производства. Согласно программе повышения надежности инженеры по надежности следят за реализацией проекта в экспериментальных цехах и наблюдают за составлением документации, связанной с переходом проекта в стадию производственного изготовления. Наблюдение за фактическим производственным процессом позволяет обнаружить существующие неопределенности или упущения и явные ошибки, допущенные при конструировании.

Обратная связь между производством и конструкторской службой. Работа по обеспечению надежности включает в себя такую важную функцию, как сбор данных о параметрах устройств, данных функционального и размерного характера (включая весовые данные) по результатам испытаний и других проверок, выполняемых на ранней стадии производства. Результаты статистической обработки сопоставляются с установленными техническими условиями пределами, контрольными допусками и указаниями по нормировке параметров, размеров, весовых данных. Материалы такого рода обеспечивают конструктора информацией о действительных возможностях производства, о

реальности установленных в конструкторской документации допусков. Это позволяет конструктору лучше приспособиться к производственным возможностям без ухудшения надежности, а может быть, и повысить надежность конструкции.

Проверка и одобрение предложений о конструктивных изменениях. После выпуска полного комплекта конструкторской документации требуется проявить особое внимание к вопросам надежности при проверке предлагаемых изменений документации и выборе практических методов проведения изменений. Опыт конструирования изобилует многочисленными примерами, когда казавшиеся абсолютно желательными изменения проявляли себя совершенно неожиданным образом, приводя к заметному ухудшению, как в функциональных характеристиках устройства, так и в его надежности.

При высоких требованиях к надежности возможных серьезных последствиях ненадежности следует принять за правило – для обеспечения безопасности не вмешиваться в испытанную и апробированную схему, конструкцию, если только в этом нет абсолютной необходимости.

Предложения о корректировочных действиях по результатам изучения причин отказов. На этапе разработки конструкции служба надежности получает большое количество данных, источниками которых служат заводские отчеты по контролю, отчеты по отказам, замечания о недостатках, обнаруженных в эксплуатационных условиях, и фактические материалы по исследованиям причин отказов изделий. По результатам анализа этих данных в конструкторскую службу направляются предложения по исследованию и принятию конструктивных мер для предотвращения возможности повторения отказов. Существуют и другие функции службы надежности, влияющие в некоторой степени на конструкцию. Большинство из них требуют не очень больших усилий (такие, как непрерывная выборочная проверка точности выполнения конструкторских чертежей), хотя являются существенными.

В некоторых случаях правительственные и промышленные организации, выступающие в качестве заказчика, предъявляют требование продемонстрировать надежность изделия. В этих случаях такие требования включаются в контракт или заказ на

поставки. Однако при высокой стоимости поставляемого изделия или высокой стоимости его испытаний, требуемых для демонстрации надежности, эти требования существенно увеличивают стоимость всей разработки.

Служба надежности, оценив потенциальную надежность на основе анализа материалов конструирования, может по собственной инициативе или по требованию руководства отслеживать рост надежности по мере выполнения и совершенствования программы разработки. Такая оценка повышения надежности требует применения как статистических, так и инженерных методов. Для определения степени повышения надежности осуществляется оценка результатов испытаний, проводимых в наземных и летных (при необходимости) условиях.

5. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Надежность машины зависит от совокупного влияния самых разнообразных факторов, которые проявляются на всех этапах ее создания и эксплуатации. В процессе разработки конструкции машины закладываются фундаментальные основы надежности отдельных узлов и деталей. Ошибка конструктора на этой стадии создания машины может привести к тому, что машина из-за недостаточной надежности отдельных деталей окажется неработоспособной.

При изготовлении машины большое влияние на качество деталей и узлов оказывают различные технологические факторы. От правильности выбора метода изготовления, назначения соответствующей упрочняющей обработки металла, качества сборки во многом зависит надежность наиболее нагруженных сопряженных деталей, рабочих органов машины. И, наконец, в эксплуатации надежность машины, созданной конструкторами и технологами, зависит от индивидуальных особенностей обслуживающего персонала, который в процессе эксплуатации машины может оказать значительное влияние на срок ее службы. Таким образом, при создании машины и последующей ее эксплуатации используются разнообразные приемы повышения надежности ее деталей и узлов.

Методы повышения надежности машин можно разделить на три основные группы: конструктивные, технологические и эксплуатационные.

Конструктивные методы повышения надежности машин включают комплекс мероприятий, связанных с созданием рациональной конструкции машины. Среди них наиболее важными являются: правильный выбор конструктивного решения, от которого зависит работоспособность сопряженных деталей в эксплуатации, экономичность и эффективность агрегата, а также правильный выбор конструктором материала и обеспечение равнопрочности деталей и узлов.

Чтобы обеспечить длительную эксплуатацию узлов машины, конструктор обязан предусмотреть простоту их обслуживания и ремонта.

К технологическим методам повышения надежности машин относятся мероприятия по улучшению свойств

материалов, применяемых в данной конструкции. Свойства детали начинают формироваться в процессе отливки, сварки, обработки давлением и механической обработки. При выполнении указанных операций закладываются прочностные характеристики и другие показатели надежности будущих деталей машин. Все последующие операции изготовления детали сводятся к улучшению свойств материала заготовки.

Как бы хорошо ни была сконструирована и изготовлена машина, ее эффективное использование окажется возможным только при нормальном уходе за ней и нормированном режиме работы. Практика показывает, что полный ресурс тракторов, автомобилей и с.-х. машин в зависимости от условий эксплуатации значительно изменяется. При неудовлетворительном уходе имеют место случаи выхода из строя новых машин в самом начале их эксплуатации. Поэтому эксплуатационные методы являются составной частью комплекса мероприятий по увеличению надежности машин.

Конструктивные методы повышения надежности машин

Конструктивные методы повышения надежности машин определяются техническими условиями на изготовление и ремонт машин. Их по праву называют фундаментом надежности.

В проекте конструктор должен использовать все достижения современной, науки и техники, вложить в него весь передовой опыт, знания, творческие решения и дать новой машине путевку в жизнь.

При конструировании необходимо обеспечить следующие основные условия и требования:

1) учет условий и географической зоны работы машины;

2) максимальная простата ТО и ремонта машины;

3) технологичность изготовления деталей;

4) использование современных высокоизносостойких материалов;

5) унификация узлов и агрегатов, (одним из главных путей решения проблем унификации является внедрение в практику проектирования машин агрегатной унификации и блочно-

модульных принципов);

6) равнопрочность и кратность сроков службы деталей машин;

7) облегчение режимов работы узлов и снижение на них нагрузок за счет правильного подбора трущихся пар.

При детальной разработке элементов конструкции первостепенное значение имеют опыт, накопленный конструкторами, и значение различных параметров проектирования деталей. В связи с этим целесообразно рассмотреть типичные случаи конструирования узлов, от надежности которых может зависеть общий межремонтный период машины.

Как известно, тракторы и с.-х. машины в процессе эксплуатации имеют в основном две группы отказов: внезапные и постепенные. Первые возникают в результате того, что действующие на деталь нагрузки превышают предельно допустимые. Поэтому для обеспечения безотказной работы машины необходимо, чтобы деталь имела определенный запас прочности. При этом увеличение запаса прочности свыше трех нецелесообразно, так как вероятность безотказной работы при этом практически не изменяется. Запас прочности может быть повышен за счет:

1) увеличения несущей способности, под которой понимаются размеры деталей с учетом предела прочности при различных видах деформации, предела усталости и других механических характеристик материала;

2) снижения нагруженности деталей путем изменения формы рабочей поверхности их и т.д.

В случае возникновения нагрузок, значительно превышающих несущую способность (например, попадание в рабочие органы посторонних предметов и др.), повышение надежности может быть достигнуто установкой предохранительных муфт. В с.-х. машиностроении широкое распространение получили кулачковые муфты, простые в изготовлении и достаточно надежные в работе.

В отличие от внезапных, постепенные отказы возникают при превышении износа рабочих органов и деталей допустимой нормы определяемой в зависимости от назначения детали и предъявляемых к ней требований.

Конструктор может повысить надежность изнашиваемых деталей путем применения износостойких материалов, рациональных геометрических форм поверхностей, снижения удельных давлений и т.д.

Известно конструктивное решение транспортерной втулочно-роликовой цепи, обеспечивающее увеличение долговечности полотен транспортера комбайнов более чем в 3 раза за счет рациональной компоновки деталей цепи и т.д.

В некоторых случаях конструктивные решения являются наиболее целесообразными и единственными, например, разработанные в ВИСХОМе высоконадежные пылезащитные уплотнения узлов позволили снизить степень загрязнения смазки абразивом в 5-10 раз, что равносильно снижению нагруженности подшипников.

Как известно, в тракторе наиболее нагруженным агрегатом является двигатель. Долговечность подшипников коленчатого вала и самого коленчатого вала в значительной мере зависит от правильного выбора конструктивных параметров указанного сопряжения. Увеличение перекрытия шеек коленчатого вала

$$\frac{d_k + d_ш}{2R} - 1, \qquad (120)$$

где dk, $dш$ – соответственно диаметр коренной и шатунной шеек; R – радиус подшипника (с 0,10 до 0,30 повышает предел выносливости вала по щеке на 30-35%).

Увеличение радиуса галтелей шатунных и коренных шеек с 4 до 6 мм увеличивает предел выносливости на 19-27%.

Применение дополнительных противовесов на щеках зеркально симметричного 4-коленного коленчатого вала снижает удельные нагрузки подшипника примерно в 1,5-2 раза, что равносильно повышение долговечности подшипников на 60-75%.

Примерно такой же эффект повышения долговечности подшипников достигается заменой параллельного подсоединения масляной центрифуги последовательным введением центробежной очистки масла в шатунных шейках. За счет использования специальных полостей повышает долговечность шатунных подшипников почти в 2 раза. Большое влияние не долговечность сопряжения поршень-гильза

оказывает толщина стенки гильзы. Так, утолщение гильзы на 8-10 мм снижает овальность гильзы в 1,5-2 раза и повышает на 60-70% ее износостойкость.

Увеличение жесткости тарелки клапана в два раза снижает износостойкость сопряжения клапан-седло на 60-85%, а введение принудительной смазки выпускных клапанов дизельным топливом дает повышение износостойкости в 2-4 раза.

Применение вставных седел клапанов из отбеленного чугуна обеспечивает повышение ресурса сопряжения на 3000 м/ч.

Увеличение запаса усталостной прочности клапанных пружин на 45-70% может быть достигнуто за счет применения специального жидкостного демпфирования колебаний путем установки клапанных пружин в стаканах, заполненных маслом.

Принудительное вращение толкателя относительно кулачков за счет смещения центра толкателя относительно оси распределительного вала дает повышение долговечности этого сопряжения на 70-90%. Применение безударного профиля кулачка на быстроходных двигателях взамен применяемых трехдуговых значительно снижает динамические нагрузки в клапанном механизме и как следствие дает повышение долговечности в 2-2,5 раза.

Увеличение жесткости привода клапанного механизма в два раза повышает долговечность механизма более чем на 60%.

Использование на двигателях мультициклонных воздухоочистителей взамен масляных повышает степень очистки воздуха на 60-75%, что равноценно увеличению ресурса двигателя в 1,4-1,7 раза.

По другим агрегатам и системам тракторов следует указать такие конструктивные способы повышения надежности, как применение биметаллических пальцев гусеничных цепей, повышающих долговечность сопряжений на 60-80%, долговечность сопряжений на 60-80%, применение индивидуальных фрикционных элементов включения передач без разрыва потока мощности, что повышает долговечность трансмиссии на 40-50%.

Большой эффект в повышении долговечности тракторных трансмиссий может быть достигнут за счет дополнительной

герметизации корпусных деталей и рациональной конструкции сапунов, обеспечивающих предохранение от попадания абразивных частиц во внутренние полости узлов; за счет снижения вредных крутильных колебаний в элементах трансмиссии, ударных динамических нагрузок зубчатых зацеплениях и пр.

Технологические методы повышения надежности машин

Эксплуатационные свойства деталей с.-х. машин в значительной мере определяются факторами, связанными с процессом получения заготовки, а также условиями ее дальнейшей обработка и сборки.

При этом механические свойства изделий зависят не только от химического состава металла и последующей упрочняющей обработки, но и от способа выплавки стали, структуры, свойств участка слитка, из которого изготовлена деталь.

По способу раскисления при выплавке различают спокойную, полуспокойную и кипящую сталь. Спокойная сталь подвергается дополнительному раскислению кремнием в ковше (содержание *Si* составляет не менее 0,17%) и применяется для изготовления особо ответственных деталей.

Кипящая сталь полному раскислению при выплавке не подвергается, слиток отличается значительным количеством пузырей, образующихся в процессе затвердевания. При последующей горячей обработке давлением (прокатке) газовые пузыри располагаются недалеко от поверхности слитка, поэтому при прокатке возможно появление опасного поверхностного дефекта – волосовин.

В полуспокойных сталях количество газов должно быть таким, чтобы компенсировать усадку металла при переходе из жидкого состояния в твердое, у большинства марок полуспокойной стали содержание кремния находится в пределах 0,05-0,15%.

Наибольшее влияние на свойства стали, оказывают следующие дефекты:

1. Дендритная, или зональная, ликвация (химическая неоднородность).
2. Усадочная рыхлость, центральная или общая пористость, газовые пузыри, межкристаллитные трещины.
3. Внутренние разрывы, трещины, рванины.
4. Неметаллические включения.
5. Шиферность и флокены в изломе.
6. Поверхностные дефекты (волосовины, завороты, плены,

заливы, раковины и т.д.).

По способу выплавки различают мартеновскую, кислородно-конверторную и бессемеровскую сталь. Формообразование фасонных отливок осуществляется заливкой расплавленного металла в металлические формы (кокили), формы из формовочной массы или методами точного литья. Для изготовления фасонных стальных отливок применяют также электросталь (основную и кислую). По химическому составу стали для отливок различают на низкоуглеродистые (0,09-0,20% С), среднеуглеродистые (0,20-0,45% С), высокоуглеродистые (свыше 0,5% С), низколегированные (содержание легирующих элементов до 2,5%), среднелегированные (2,5-10%) и высоколегированные (содержание легирующих элементов свыше 10%).

Значительное влияние на механические свойства отливок оказывают различные присадки, вводимые непосредственно в жидкую сталь с целью улучшения (модификации) ее структуры.

Модификаторы, не изменяя, как правило, предела прочности, повышают пластические свойства стали.

Особое влияние на качество отливок оказывают остаточные напряжения, являющиеся результатом совместного действия температурного (неодинаковая скорость охлаждения различных частей детали), усадочных и структурных факторов. Учитывая разнообразную форму, которая придается отливкам, следует принять специальные меры для предупреждения появления остаточных линейных напряжений. Значительное повышение механических свойств отливок достигается приданием искусственного или естественного их старения.

Так, применение естественного старения блок-картера двигателя повышает его предел усталости в среднем 1,3-1,5 раза, а головки цилиндров – в 1,4-1,8 раза.

Существенное влияние на надежность машины оказывает термическое и химико-термическая обработка. В таблице 19 приведены основные методы термической обработки деталей машин.

Изменение свойств металлов при термической обработке происходит в результате определенных изменений в структуре. Как метод упрочнения наиболее широкое распространение в практике получила закалка в сочетании с отпуском при

определенных температурах. Помимо двойной указанной выше упрочняющей обработки применяют также изотермическую закалку в горячих средах, которая имеет некоторые преимущества перед первой, например, снимает остаточные напряжения, снижает чувствительность к концентрации напряжений и пр.

Таблица 19 – Классификация методов упрочнения металла

Метод упрочнения	Виды технологического процесса
1	2
Упрочнение созданием пленки на поверхности	
Осаждение химической реакции	Оксидирование, сульфидирование, фосфанирование, нанесение упрочняющего смазочного материала, осаждение их газовой фазы
Электролитическое осаждение	Хромирование, борирование, электрофорез
Осаждение твердых осадков из паров	Электроискровое легирование, катодно-ионная бомбардировка, термическое испарение тугоплавких соединений
Напыление износостойкого соединения	Плазменное напыление порошковых материалов, детонационное напыление, электродуговое напыление, лазерной напыление
Упрочнение изменением химического состава поверхностного слоя металла	
Диффузионное насыщение	Нитрооксидирование, нитроцементация, азотирование, борирование, цианирование, сульфоцианирование, никелирование, легирование маломощными пучками ионов
Упрочнение изменением структуры поверхностного слоя	
Физико-термическая обработка	Лазерная закалка, плазменная закалка
Электрофизическая обработка	Электроимпульсная обработка, электроконтактная обработка, электроэрозионная обработка, ультразвуковая обработка
Механическая обработка	Упрочнение вибрацией, дробеструйная обработка, обработка взрывом, термомеханическая обработка,

	прокатывание, волочение, редуцирование
Наплавка легированным металлом	Газовым пламенем, электрической дугой, плазмой, лазерным лучом, пучком ионов

Окончание таблицы 19

1	2
Упрочнение изменением энергетического запаса	
Обработка в магнитном поле	Электроферромагнитная обработка, обработка в импульсном магнитном поле
Упрочнение изменением шероховатости поверхности	
Электрохимическое полирование	Окунание в ванну в струе электролита
Обработка резанием	Шлифование, суперфиниширование, хонингование
Пластическое деформирование	Накатка, раскатка
Упрочнение изменением структуры всего объема металла	
Термическая обработка при положительных температурах	Закалки, светлая, объемная, изотермическая, непрерывная, с самоотпуском, с подстуживанием, ступенчатая; отпуск высокий, низкий
Криогенная обработка	Закалки с обработкой холодом с температурой закалки или охлаждение с нормальной температурой, термоциклирование

Изотермическая закалка стали 6ХС позволяет увеличить пластическую и ударную вязкость в 3-5 раз по сравнению с трехслойной сталью, закаленной на одну и ту же твердость. Например, термическая закалка чугунных коленчатых валов повышает изностойкость шеек и подшипников в 1,7-2,2 раза.

В последние годы широкое применение нашел метод повышения долговечности ответственных штампованных деталей, называемый термо-механической обработкой (низкотемпературной – НТМО и высокотемпературной – ВТМО). Клапаны, изготовленные по методу НТМО, имеют повышенный в 1,6 раза предел усталости и увеличенную на 40% износостойкость трущейся поверхности.

Наиболее высокие механические свойства при применении ТМО получают у сталей с содержанием 0,5-0,6% углерода.

Кроме чисто термических методов упрочнения применяются различного рода химико-термические методы: цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование,

хромирование, борирование, алитирование, силицирование и пр.

Так, цементация поверхности зубьев колес с модулем 4 мм, изготовленных из стали 18ХГТ, на глубину 1,0-1,4 мм дает повышение износостойкости в 1,8-2 раза по сравнению с колесами стали 40Г2, поверхность зубьев которых подвержена закалке ТВЧ.

Азотированию подвергаются специальные стали, легированные хромом, алюминием, молибденом, вольфрамом, никелем. Например, стали 38ХМЮА, 30Х2НВЮА, 38ХВЮА, 40ХНМА и др.

При азотировании обычных углеродистых сталей твердость поверхности получается не очень высокая, однако выше, чем при закалке ТВЧ. Так, азотирование поверхности шеек коленчатых валов, изготовленных из стали 45, повышает поверхностную твердость до HRC 59-63, а износостойкость при этом увеличивается в 1,5-1,7 раза по сравнению с закалкой ТВЧ. Эффект повышения долговечности указанных легированных сталей еще выше.

Хромирование деталей широко применяется для повышения износостойкости и лучшей приработки. Износостойкость хромированной стали с содержание углерода 0,65% более чем в 44 раза превышает износостойкость закаленной стали ШХ15. Хромированию подвергают верхние компрессионные поршневые кольца двигателей.

Из других способов упрочнения следует отметить силицирование, представляющее собой насыщение поверхностных слоев детали кремнием, который позволяет значительно повысить износостойкость и коррозионную стойкость.

В последние годы все более широкое применение на практике находят способ наплавки износостойких материалов и биметаллизация. Применяют следующие наплавочные материалы: высокохромистые, вольфрамовые и молибденовые чугуны, нихромы, нимоники, колмонои, хастеллои, стелоиты, сплавы с карбидом вольфрама и хрома. В этом случае имеется возможность в качестве основы применять материалы пониженной износостойкости, т.е. менее качественные и, следовательно, более дешевые. Так, применение наплавки

внутренней поверхности гильз цилиндров сплавом Ж4НДХ-15-7-2 (нирезит) повышает их износостойкость в 4-6 раз, а наплавка фасок выпускных клапанов нихромом Х25Н40Р6 дает повышение долговечности в 7 раз. Метод упрочнения поверхностей путем применения наплавок нашел особенно широкое применение после разработки индукционного способа наплавки порошковыми твердыми сплавами. К твердым сплавам относятся Сормайт-1, ПС-5, В-I5, сплавы на хромо-титановой основе (типа ХТ) и др. Наибольшее распространение в с.-х. машиностроении нашел твердый сплав Сормайт-1, представляющий собой высоколегированный чугун, микроструктура которого состоит из крупных включений карбидов хрома, эвтектики и остаточного аустенита.

В с.-х. машиностроении разрабатываются также новые способы наплавки. К ним, прежде всего, относится метод плакирования износостойкой лентой, в основу которого положена роликовая контактная сварка. Среди других способов упрочнения следует отметить борирование, наплавку плазменными горелками и др.

Для практических целей необходимо, чтобы знаки внутренних и рабочих напряжений были разными. В этом случае внутренние напряжения могут повысить предел прочности материала. В противном случае в отдельных местах детали возможна концентрация напряжений, приводящая к поломке детали.

Различают два способа упрочнения – упругое и пластическое.

Упругое упрочнение, скорее всего, относится к конструктивным способам повышения надежности машин. Сущность его состоит в создании в детали деформаций (напряжений), противоположных деформациям при рабочем нагружении.

Примером этого вида упрочнения могут служить рамные конструкции широкозахватных с.-х. машин (сеялки, сцепки и др.), деформированные шпренгелями – стержнями из высокопрочного материала. Предварительная деформация рамы осуществляется с помощью резьбы, расположенной на концах шпренгеля. Во время работы рама вначале разгружается, потом нагружается рабочей нагрузкой, а

шпренгель только нагружается.

При пластическом упрочнении участки материала, наиболее нагруженные в рабочем состоянии, предварительно подвергает пластической деформации, создавая в них остаточные напряжения, противоположные по знаку рабочим.

Различают следующие виды пластического упрочнения: упрочнение перегрузкой, наклепом, объемным уплотнением.

Упрочнение перегрузкой заключается в воздействии на деталь повышенной силы того же направления, что и рабочая, и вызывающей пластические деформации крайних волокон. Например, при изгибе бруса силой того же направления, но большей величины, при этом в крайних волокнах возникает пластическая деформация, а в средних – упругая. После снятия упрочнявшей нагрузки под действием упругой деформации сердцевины в наружных волокнах появляются напряжения обратного знака рабочим напряжениям. Таким способом упрочняют резервуары и детали, работавшие на изгиб и кручение при нагрузке одного знака.

В процессах изнашивания, усталостного, коррозионного, эрозионного и кавитационного разрушений важную роль играют состояние и свойства тонкого поверхностного слоя деталей машин, от которых зависят характер образующихся вторичных структур и развитие явления структурной приспособляемости материалов в процессе эксплуатации. Формирование этого слоя происходит при окончательной обработке деталей.

В настоящее время разработано много способов изменения состояния, структуры и свойств тонкого поверхностного слоя деталей машин.

Технологическая обработка представляет собой многостадийный процесс, и поэтому внутренние напряжения в готовой детали являются результатом наложения и взаимодействия напряжений, возникающих на каждой стадии процесса. Неоднородности слитка переходят в поковку или прокат, горячая обработка давлением вводит новые неоднородности, а механическая обработка вызывает перераспределение напряжений, имеющих место в заготовках и вносит в поверхностные слои дополнительные напряжения. Термическая обработка, частично устраняя напряжения, возникающие на предшествующих стадиях, вместе с тем

вызывает появление новых напряжений.

Физические процессы, происходящие при механической обработке, вызывают определенные изменения обрабатываемой поверхности. Качество обработанной поверхности и поверхностного слоя металла может быть охарактеризовано геометрическими факторами и физико-механическими свойствами металла.

К геометрическим факторам относятся макрогеометрия, волнистость, шероховатость, направление штрихов. К физико-механическим – твердость, тонкая кристаллическая структура, внутренние напряжения.

К числу технологических факторов, значительно влияющих на надежность машин, относится качество сборки. Например, затяжка шатунного болта при сборке с моментом 120 Нм вместо 180 Нм, как указано в ТУ, снижает долговечность болта в 2-2,5 раза. Примерно такое же снижение долговечности наблюдается при повышении до 250 Нм момента затяжки шпилек. Несоблюдение регламентированного порядка затяжки шпилек крепления головки цилиндров резко (в 2-5 раз) снижает долговечность головки цилиндров и ведет к повышенному угару масла за счет увеличения овализации гильз цилиндров. Несоответствие момента затяжки шпилек крепления крышек коренных опор двигателя ведет к преждевременному усталостному разрушению коленчатого вала или к задиру вкладышей.

Причинами отказов резьбовых соединений чаще всего выступают несоблюдение моментов затяжки, самоотвинчивание гаек, недостаточные стопорящие свойства стандартных гаек, нарушения плоскости поверхности соединяемых деталей. Большое число отказов резьбовых соединений обусловлено недостаточными прочностными показателями болтов. Поэтому повышение надежности резьбовых соединений может быть обеспечено за счет усилия стопорящих свойств гаек, соблюдения заданной величины момента затяжки и т.д. при условии жесткого обеспечения технологической дисциплины в процессе сборки машин. Самым перспективным проявлением повышения надежности резьбовых соединений является внедрение нового самоконтрящегося крепежа.

Эксплуатационные методы повышения надежности машин

Конструктивное совершенство и высокое качество изготовления или ремонта и сборки машины не гарантирует длительной и безаварийной ее работы. Дополнительным условием являются грамотная эксплуатация и целесообразная система ТО и ремонта. Задачами технической эксплуатации машин является обеспечение ее исправного технического состояния, а также безаварийной работы при надлежащей экономичности.

Уровень технической эксплуатации машин определяется установкой их в надлежащем месте, рациональным использованием в соответствии с назначением, квалификацией обслуживающего персонала, постановкой ухода и технического надзора за машинами, организацией смазочного хозяйства. Поэтому выполнению эксплуатационных мероприятий должно уделяться особое внимание.

Выполняя правила эксплуатации по ТО и хранению машин, можно продлить срок их службы и поддерживать надежность на заданном уровне. Однако этим не исчерпывается влияние эксплуатации на надежность машин. Установлено, что надежность машины увеличивается с уменьшением среднего значения возникающих при работе машин усилий, а также при сокращении его рассеивания. Снизить нагруженность мобильных машин можно, наряду с конструктивными методами, также путем совершенствования агротехники, применения современных способов обслуживания и диагностики машин.

Неравномерность поступления в машину обрабатываемого с.-х. продукта, обусловленная различием в урожайности, также оказывает значительное влияние на нагруженность машины. Установлено, например, что равномерная подача хлебной массы в молотильное устройство зерноуборочного комбайна существенно снижает динамические нагрузки, а также улучшает процесс отделения зерна от колоса и благоприятствует сепарации вороха.

Равномерность подачи имеет большое значение для

районов, где уборка производится при повышенной влажности хлебов. В этом случае даже незначительное повышение неравномерности поступления хлебной массы приводит к забиванию рабочих органов комбайна. Для устранения этого применяются различные автоматические устройства (автотехнологи), позволяющие при повышении подачи хлебной массы уменьшить скорость движения машины.

Значительное влияние на нагруженность машины оказывает почва, ее состав. Почва характеризуется определенным составом, механическими характеристиками, твердостью и влажностью. Расположение почвы в пространстве характеризует ее микро- и макрорельеф. В качестве примера влияния характеристик почвы на нагруженность рабочих органов рассмотрим тяговое сопротивление плуга, которое хорошо описывается рациональной формулой В.П. Горячкина:

$$P = fG + kab + EabV^2, \qquad (121)$$

где a – глубина; b – ширина пахоты; V – скорость движения; G – вес плуга; f – коэффициент трения плуга о почву; k – коэффициент, характеризующий деформацию пласта; E – скоростной коэффициент.

Один из путей снижения нагруженности плуга состоит в создании структурности почвы. Как известно, структурная почва имеет меньшее удельное сопротивление и требует для разрушения меньшие затраты энергии.

Такие мероприятия, как посев многолетних трав, способствуют созданию структурности почвы. Создание структурной почвы имеет также в виду удаление с поля камней, металлических предметов, приводящих к поломкам сельскохозяйственных машин.

Если создание структурной почвы требует многолетней работы, то улучшение ее микрорельефа возможно осуществить при наличии технических средств значительно быстрее.

Таким образом, агротехнические мероприятия по улучшению полей значительно повышают надежность машин.

Сельскохозяйственные машины работают в очень тяжелых условиях, при наличии большого количества абразива и пыли, которые проникают даже к защищенным элементам

трущихся поверхностей. В этих условиях существенное значение приобретает смазка. Неправильное применение смазывающего материала или периодичности смазывания может привести к отрицательным последствиям.

Наличие смазки между трущимися поверхностями позволяет снизить коэффициент трения, а также тангенциальные напряжения в материалах поверхностей, что приводит к повышению долговечности элементов трущихся деталей.

На противоизносные свойства смазки оказывает значительное влияние ее основной параметр – вязкость. Качество смазки определяется сохранением заданной вязкости при значительных колебаниях температуры и давления в зоне контакта. Возможность создания необходимой толщины масляной пленки при реальных давлениях и температуре позволяет исключить износ трущихся поверхностей. В противном случае смазка может ухудшить условия контакта и привести к снижению долговечности узла.

Ресурс тракторных двигателей до капитального ремонта в зависимости от периодичности смены масла изменяется в 1,5-2 раза, износ рессорных пальцев тракторов – в 1,5 раза, шестерен КПП – в 1,2-2 раза, деталей трансмиссии – в 2-3,5 раза. При увеличении периодичности смены масла в 2 раза износ цилиндров возрастает на 16%, поршневых колец – на 29%, вкладышей – на 25%. При работе в течение продолжительного времени без смены масла износ увеличивается соответственно на 26,62 и 54,00%.

К числу эксплуатационных способов повышения надежности машин относятся также организационно-технические мероприятия, способствующие реализации установленных графиков планово-предупредительных ремонтов, осуществлению систематического контроля состояния сопряженных деталей.

Большое влияние на интенсивность износа ответственных деталей оказывает качество ухода за машиной в эксплуатации, особенно своевременная смазка трущихся частей, предохранение их от загрязнения.

Рационально организованная эксплуатация машин может не только сохранить заложенные в них показатели надежности,

но и повысить их. В наибольшей мере на надежности тракторов и с.-х. машин в процессе эксплуатации сказывается организация и качество ремонта.

Ремонт – весьма важное звено в общей системе поддержания работоспособного состояния машин. Основные причины низкого качества ремонта – слабая технологическая дисциплина, несовершенство технологии и организации работ, отсутствие контроля качества запчастей, комплектующих изделий и отремонтированных машин, недостаточное обеспечение ремонтных предприятий современными средствами механизации и автоматизации, а также нормативно-технической документацией, низкий уровень ремонтопригодности техники.

К основным аспектам правильной организации ремонта тракторов следует отнести безразборную диагностику состояния деталей, создание оборотного фонда агрегатов и узлов, разработку научно обоснованных нормативов на ремонт, организацию, размещение и структуру ремонтных предприятий, разработку технологии ремонта деталей и узлов.

Важное значение имеет организация службы информации о надежности серийных тракторов и с.-х. машин. Систематизация данных о работоспособности каждой модели в различных эксплуатационных условиях является отправным моментом при модернизации тракторов и с.-х. машин серийного производства и при создании новых.

Необходимо также уделять внимание организации систематических испытаний как машин в целом, так и отдельных узлов на надежность.

Большое влияние на надежность тракторов и с.-х. машин оказывает правильность регулировки основных агрегатов в эксплуатации.

Исследованиями установлено, что увеличение регулировочных зазоров в клапанном механизме с 0,4 до 0,8 мм ведет к росту динамических нагрузок в механизме на 30-40%, что соответствует увеличению скорости изнашивания основных сопряжений клапанного механизма на 26-30%. И наоборот, уменьшение зазоров с 0,4 до 0,1 мм ведет к повышению температуры клапанов и фасок седел клапанов в головке на 70-80%, что в большинстве случаев является

причиной преждевременного выхода из строя указанного сопряжения.

В случае несоблюдения правил ухода за воздухоочистителями (несвоевременные смена масла, промывка кассет и др.), а также из-за неплотностей в соединениях резко усиливается вредное воздействие пыли на износ основных сопряжений двигателя.

По данным НАТИ, при подсосе 1% нефильтрованного воздуха скорость изнашивания верхних поршневых колец увеличивается в 4 раза.

Долговечность и безотказность с.-х. машин в эксплуатации зависят от целого ряда мероприятий, которые необходимо соблюдать.

1. Обкатка новых и отремонтированных машин в хозяйствах. Проводится в течение 50-60 ч при постепенном повышении нагрузок в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей или ремонтных предприятий и является основой длительной и безотказной работы машин. Обкатка тракторов включает: проверку работы двигателя без нагрузки и работу трактора с постепенным повышением нагрузки при выполнении с.-х. и транспортных работ, не требующих значительных тяговых усилий. Во время обкатки контролируют работу двигателя и всех агрегатов для выявления повышенного нагрева, шумов, вибраций и стуков, утечки масла, прорыва газов, нарушения герметичности и др. Тщательно выполняют все операции ЕТО.

По завершении обкатки проводят плановое ТО-1 трактора с заменой сказки в двигателе и во всех агрегатах. Ограничитель мощности снимают через 120 ч работы двигателя.

2. Организация ТО и создание для его проведения необходимой базы. Система ТО с.-х. машин предусматривает проведение ежесменных (через 8-10 ч), сезонных (два раза в год) и плановых ТО. Периодичность проведения ТО машин необходимо строго соблюдать независимо от загрузки их различными с.-х. работами. Работа на машинах без проведения установленных ТО запрещается.

3. Проведение периодических технических осмотров и технического диагностирования состояния машин. Это

позволяет своевременно обнаружить и устранить неисправности, предотвратить отказы, оценить техническое состояние, остаточный ресурс машин, улучшает деятельность технических служб хозяйств и повышает надежность используемой техники.

4. Обеспечение нормального режима работы машин. Перегрузка машин по нагрузке и скорости, ее перегрев, неправильные регулировки зазоров в сопряжениях, несоблюдение условий запуска двигателей нарушают температурный режим работы и условия смазки трущихся поверхностей деталей, что приводит к форсированному их износу, вызывает поломки и подплавление деталей. Для устранения этих явлений необходимо исключить перегрузку и перегруз машин, организовать теплые стоянки, использовать электрические подогреватели масла, подавать к машинам подогретую воду, использовать технические жидкости типа (тосол) и т.п.

5. Уменьшение отложений на деталях и в смазочной системе. Эти отложения образуются в результате старения масла, а в автотракторных двигателях, кроме того, из продуктов разложения и неполного окисления топлива. Углеродистые отложения в автотракторных двигателях разделяются на три вида: нагар, лак, осадки (шлам). Нагар и лаковые отложения на поршне и поршневых кольцах приводят к их перегреву из-за ухудшения условий теплоотвода в заклинивании поршневых колец в канавках поршня.

Накопившийся шлам забивает фильтры, маслоохладители и полости центрифуг, уменьшает пропускную способность масляных каналов, уменьшает отвод тепла от масляных радиаторов. Забивка шламом приемника масляных насосов может полностью нарушить работу системы смазки. При центробежной очистке масла в полости шатунных шеек коленчатых валов автотракторных двигателей отложившийся шлам освобождается от жидкой фазы и спрессовывается.

Эти условия увеличивают дисбаланс в плоскостях коррекции автотракторных двигателей, нарушают уравновешенность и снижают их ресурс.

Поэтому в процессе эксплуатации и проведения ТО машин необходимо удалять с деталей нагар, лаковые отложения и шлам, используя безразборные и разборные методы и

различные моющие средства.

6. Соблюдение правил хранения машин. Для обеспечения сохранности техники следует организовывать специальные помещения и площадки с твердым покрытием, использовать различные подставки и подкладки, очищать делали от технологических загрязнений и почвы, наносить на неокрашенные поверхности защитные смазки, восстанавливать лакокрасочные покрытия, хранить в закрытых помещениях электрооборудование, резину, приборы и др.

Необходимо строго соблюдать рекомендации по применению топливо-смазочных материалов, придерживаться сроков смены масел и смазок, перед заправкой отстаивать (не менее 40 ч) и фильтровать материалы.

7. При эксплуатации машин следует должное внимание уделять герметизации. Это предупреждает попадание в машину абразива. Герметичность нарушается вследствие ослабления креплений крышек под действием вибраций, колебаний, силовых и тепловых деформаций, низкого качества прокладочного материала, износа и коробления корпусных деталей и их плоскостей разъемов.

Резервирование машин и сборочных единиц

Одним из наиболее распространенных путей повышения надежности является резервирование. Сущность его состоит в том, что в систему вводятся избыточные элементы, узлы и даже целые агрегаты, которые включаются в работу по мере выхода из строя основных элементов. Например, на крупных электростанциях – дополнительные генераторы; автомобили имеют запасное колесо и т.д.

Предположим, что имеется n устройств, которые должны работать одновременно в течение времени t.

Вероятность того, что какое-нибудь из них безотказно проработает этот срок, равна P (одна и та же для всех устройств). Отказ хотя бы одного из устройств приводит к отказу всей системы (прокол одного колеса приводит к отказу автомобиля).

Вероятность того, что система проработает безотказно, на основании формул Бернулли, равна Pn.

Как же изменяется вероятность безотказной работы системы, если в ней, помимо основных устройств, имеется еще

m резервных, находящихся в нагруженном достоянии, т.е. в том же режиме, в каком работают основные устройства.

Отказом по-прежнему считается переход системы в такое состояние, когда в ней число работоспособных устройств оказывается меньшим n. Тогда вероятность безотказной работы системы равна 0,6561. Если же имеется один резервный элемент, то эта вероятность становятся равной 0,9185.

Поэтому один-единственный элемент в резерве увеличивает вероятность безотказной работы четырех таких же элементов почти в 1,5 раза; два резервных элемента увеличивают вероятность безотказной работы системы до 0,9844.

Надежность системы увеличивается во много раз, если использовать резервирование с восстановлением: каждое отказавшее устройство немедленно восстанавливается и после восстановления поступает в резерв. Таким путем удается увеличить надежность резервированных систем во много раз.

Резервирование – это метод повышения надежности объекта введением избыточности, т. е. введением дополнительных средств и возможностей сверх минимально необходимых, для выполнения объектом заданных функций.

В зависимости от того, что предусматривается использовать при резервировании: избыточные элементы структуры объекта, избыточное время, избыточную информацию, резервирование бывает структурное, временное и информационное.

Функциональное резервирование предусматривает использование способности элементов выполнять дополнительные функции.

Нагрузочное резервирование предусматривает использование способности объекта воспринимать дополнительные нагрузки.

Основным называют элемент структуры объекта, минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций.

Резервный элемент (резерв) – элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Кратность резервирования – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов объекта.

Дублирование – резервирование, кратность которого равна единице.

Резервирование – один из способов значительного повышения надежности объектов. При выходе из строя одного из элементов резервный элемент выполняет его функции, и объект не теряет работоспособности.

В надежности различают два основных вида соединения элементов: последовательное и параллельное.

Под последовательным соединением элементов в надежности понимают такое соединение, при котором отказ одного какого-либо элемента влечет за собой отказ всей системы. Этому условию подчиняется большинство приводов и механизмов передач машин, так как выход из строя одной детали вызывает потерю работоспособности всей системы.

Основными показателями надежности восстанавливаемых систем являются:

- наработка на отказ T;
- функция готовности $K_{\text{г}}(t)$;
- коэффициент готовности $K_{\text{г}}$.

Эти показатели зависят от вида и кратности резервирования, дисциплины и качества ремонтно-обслуживающих воздействий.

Для повышения надежности техники наиболее часто применяются два вида резервирования: с постоянно включенным резервом и по методу замещения отказавшего элемента. При этом обслуживание и ремонт системы могут осуществляться с двумя видами приоритета – прямым и обратным. При прямом приоритете техника обслуживается в порядке поступления ее в ремонт. При обратном приоритете первой обслуживается техническая система, поступившая в ремонт последней.

Структурное резервирование с возможностью восстановления отказавших элементов в процессе функционирования системы является наиболее эффективным способом обеспечения и повышения надежности техники и снижения техногенного риска.

Однако применение резервирования удорожает технику и

ее эксплуатацию. Поэтому кратность резервирования ограничена, и в большинстве случаев применяется резервирование с кратностью m=1 (дублирование). Из двух указанных видов резервирования наибольший рост надежности достигается при резервировании замещением. При этом этот вид резервирования имеет два недостатка:

- для его использования на практике требуется устройство для контроля состояния системы и коммутации при отказе работающей системы;
- снижается производительность системы, так как резервные элементы до отказа основных не работают.

С учетом недостатков резервирования замещением на практике наиболее часто применяется резервирование с постоянно включенным резервом надежности.

Наработка на отказ и коэффициент готовности резервированных восстанавливаемых систем при использовании одной или двух ремонтно-обслуживающих бригад вычисляются по следующим формулам:

а) система с постоянно включенным резервом:

одна обслуживающая бригада (n=1):

$$T = T_o\left(1 + \frac{1}{2p}\right), K_г = \frac{1 + 2p}{1 + 2p + 2p^2}; \quad (122)$$

две обслуживающие бригады (n=2):

$$T = T_o\left(1 + \frac{1}{2p}\right), K_г = \frac{1 + 2p}{1 + 2p + p^2}; \quad (123)$$

в) система замещением:

одна обслуживающая бригада (n=1):

$$T = T_o\left(1 + \frac{1}{p}\right), K_г = \frac{1 + p}{1 + p + p^2}; \quad (124)$$

две обслуживающие бригады (n=2):

$$T = T_o\left(1 + \frac{1}{p}\right), K_г = \frac{1 + p}{1 + p + 0{,}5p^2}; \quad (125)$$

где $p = \frac{\lambda}{\mu}$; $T_0 = \frac{1}{\mu}$.

Определение среднего времени безотказной работы системы

Формулы для расчета среднего времени безотказной работы для различных способов резервирования имеют вид:

- система с постоянно включенным резервом:

$$T_б = T_o\left(1{,}5 + \frac{1}{2p}\right); \qquad (127)$$

- система с резервированием методом замещения:

$$T_б = T_o\left(1{,}5 + \frac{1}{2p}\right); \qquad (128)$$

где T_o – среднее время безотказной работы нерезервированной системы.

Определение риска системы

Риск исходной нерезервированной системы определяется по формуле

$$R(t) = \frac{r\lambda t}{1+p}, \qquad (128)$$

где $R(t)$ – риск системы.

Риск резервированной системы с кратностью резервирования m=1 определяется по формулам:

для постоянно включенного резерва:

$$R(t) = \frac{r\lambda 2p}{1+2p}; \qquad (129)$$

для резерва замещением:

$$R(t) = \frac{tr\lambda p}{1+p}. \qquad (130)$$

Для нерезервированной системы показатели надежности вычисляются по следующим формулам:

$$K_{\text{г}}(t) = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c} + \frac{\lambda_c}{\lambda_c} e^{-(\lambda_c + \mu_c)t} \ ; \tag{131}$$

$$T = \frac{1}{\lambda_c}; \tag{132}$$

$$\lambda_c = \sum_1^n \lambda_i; \tag{133}$$

$$\mu_c = \frac{\lambda_c}{\sum_1^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}; \tag{134}$$

$$K_{\text{г}} = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c}, \tag{135}$$

где n – число элементов системы; t – текущий момент времени, час; λ_c – интенсивность отказа системы; μ_c – интенсивность восстановления системы; λ_i и μ_i – интенсивности отказа и восстановления i-го элемента системы.

Для вычисления риска системы $R_c(t)$ целесообразно пользоваться следующими двусторонними оценками:

$$K_{\text{г}} \cdot t \sum_1^n \lambda_i \cdot r_i \le R_c(t) \le t \cdot \sum_1^n \lambda_i \cdot r_i, \tag{136}$$

где K_{Γ} – коэффициент готовности системы; r_i – риск системы из-за отказа i-го элемента, усл. ед.

Ремонтные мероприятия повышения надежности машин

Качество и надежность отремонтированных машин в значительной степени зависят не только от уровня технологии и организации ремонтных работ и восстановления изношенных

деталей непосредственно на ремонтных предприятиях, но и от системы организации ремонта машин в целом, а также от уровня работы предприятий, обеспечивающих поставку запасных частей, оборудования, материалов. Решающее влияние на качество ремонта машин оказывает степень конструктивной и технологической доработанности, ремонтопригодности и долговечности новых машин, их агрегатов и сборочных единиц.

Система организации ремонта машин в целом совершенствуется в направлениях, которые значительно повысят долговечность и надежность отремонтированных машин.

Ремонт машин представляет собой весьма важное звено в общей системе поддержания машинно-тракторного парка в работоспособном состоянии. При ремонте машин одновременно возможны их модернизация и проведение мероприятий по повышению долговечности. Основные пути решения этой задачи следующие.

Обеспечение сохраняемости ремонтного фонда, поступающего на ремонтные предприятия. Достигается организацией соответствующих складов и площадок, применением различных подставок и подкладок, антикоррозионных смазок и других средств. Особое внимание следует уделять защите от коррозии ремонтного фонда деталей машин, поступающих для восстановления, которые при неудовлетворительном хранении могут быть превращены в металлолом.

Выполнение разборочных работ при условиях, исключающих повреждение деталей и разукомплектовку пар. При разборочных работах рекомендуется главное внимание уделять использованию средств механизации (особенно гидравлических станции, прессов и др.), обеспечивающих небольшой процент повреждения деталей (особенно подшипников качения), а также различных контейнеров для сохранения комплектов деталей соответствующих узлов и агрегатов. Запрещается раскомплектовывать блоки цилиндров, крышки подшипников коленчатого вала, шатуны и их крышки, пары шестерен конечных и других передач и т.п.

Внедрение на ремонтных предприятиях эффективной

мойки и очистки деталей от различных загрязнений – одно из наиболее решающих условий обеспечения высокого послеремонтного ресурса машин. Удаление нагара, смолистых отложений, накипи и других загрязнений – специфический ремонтный процесс, отличающийся определенными трудностями и требующий большого внимания, а также использования современных моечных машин и установок, новых комплексных моечных препаратов, содержащих поверхностно-активные компоненты, и обеспечения заданных режимов мойки, особенно поддержания температуры моечных ванн (75...90 °С). Наиболее эффективные моющие средства – комплексные препараты МЛ-51 (для мойки деталей), МЛ-52, АМ-15 и «Эмульсин» (для удаления смолистых отложений), а также новые синтетические препараты МС-5, МС-6, МС-8, Лабомид.

Контроль и дефектация изношенных деталей машин в значительной мере определяют сроки их службы. Учитывая, что 80% деталей тракторов подвергаются износу до 0,2 мм, а также принимая во внимание высокую точность изготовления автотракторных деталей (1, 2, 3-го класса) и новые (ужесточенные) технические условия на ремонт машин с повышенным ресурсом, на ремонтных предприятиях следует расширить номенклатуру деталей, подвергаемых сплошному контролю, применение предельных (пробки, калибры, скобы), универсальных (индикаторы, микрометры, миниметры) измерительных инструментов и средств пневматического контроля, обеспечивающих повышение точности измерений размеров (геометрии) до 0,01... 0,001 мм. Такие детали машин, как коленчатые валы, шатуны, коленчатые оси и поворотные цапфы, блоки и гильзы цилиндров и другие, в целях повышения надежности отремонтированных машин должны обязательно быть проверены на отсутствие скрытых дефектов (особенно трещин) методами, широко используемыми в машиностроении на передовых ремонтных предприятиях (магнитная, люминесцентная, ультразвуковая и рентгеновская дефектоскопия, гидравлическая опрессовка и др.)

Сплошной контроль размеров и геометрии рабочих поверхностей базовых деталей машин, поступающих в ремонт, а также точности их взаимного расположения. За

время эксплуатации на машинах в этих деталях в результате старения материала, износов, а также воздействия различных нагрузок и перераспределения внутренних напряжений происходят изменения размеров, геометрии и взаимного расположения рабочих поверхностей, которые должны быть устранены. Это обеспечивает высокую работоспособность не только самой базовой детали, но и всего агрегата. Восстановлением и стабилизацией размеров базовой детали ремонтные предприятия имеют возможность повышать ресурс отремонтированных машин даже по сравнению с новыми, детали которых не подвергались искусственному старению.

Внедрение на ремонтных предприятиях входного контроля, особенно новых деталей, диктуется необходимостью в связи с тем, что многочисленными проверками установлены значительные отклонения их размеров и геометрии от заданных значений по рабочим чертежам.

Тщательный весовой и размерный подбор деталей цилиндропоршневой группы. В связи с форсированием современных двигателей по оборотам и нагрузке необходим тщательный подбор по массе деталей цилиндропоршневой группы. Особенно это важно для ремонтных предприятий, так как в результате износов ослабляется прочность и жесткость ряда деталей, наблюдаются их раскомплектовка и замена, а также другие отклонения. В качестве примера можно указать, что для отремонтированных двигателей СМД разность в массе комплекта поршней не должна превышать 7 г, а шатунов – 12 г.

Динамическая балансировка коленчатых и карданных валов, маховиков, муфт сцепления и других узлов и деталей. Для динамической балансировки деталей ремонтные предприятия оснащаются специальными машинами типа БМ-У4.

Обеспечение регламентированных посадок, усилий затяжки и сборки резьбовых соединений и других требований при сборке агрегатов машин, особенно автотракторных двигателей, – ответственное мероприятие, границы которого для каждой машины определены типовой технологией сборки.

Обеспечение хорошей герметизации агрегатов и сбо-

рочных единиц при их ремонте определяется не только заменой сальниковых уплотнений, но и устранением постоянно возникающих короблений плоскостей разъемов деталей, а также восстановлением изношенных резьбовых креплений, применением специального прокладочного материала ЛАСП, прокладок из паронита и герметизирующих паст У-20А, УН-25, УН-01 (рекомендации ГОСНИТИ). Необходима проверка качества сборки и герметизации сборочных единиц (агрегатов).

Стендовая обкатка и испытания – ответственный начальный период работы смонтированных сборочных единиц и агрегатов машин. Поэтому в условиях ремонтных предприятий они должны выполняться и совершенствоваться: введением обкатки под нагрузкой (не только двигателей, но и агрегатов трансмиссий машин), применением осерненных и новых обкаточных масел (ОМ-2) и присадок (АЛП-2) к топливу, тщательной очисткой, охлаждением и централизованной подачей масла, а также топлива и воды.

В процессе стендовой обкатки и испытаний необходим тщательный контроль с целью выявления посторонних шумов и стуков, повышенного нагрева, течи масла, воды и топлива, нарушения регулировок и др. После обкатки проводится контрольный осмотр двигателей и агрегатов, повторное испытание (при необходимости), замена смазки и промывка агрегатов дизельным топливом, а также очистка и замена фильтрующих элементов. Особое внимание при этом обращают на состояние, герметичность и нормальную работу воздухоочистителей.

Повышение качества окраски ремонтируемых машин, а следовательно, их сопротивляемости коррозии в условиях ремонтных предприятий, выполняется следующими приемами: снятием старой окраски в горячих щелочных ваннах, применением эффективных грунтов и эмалей; окраской отдельно агрегатов (до общей сборки машин) и машин в целом (после обкатки и испытаний) с применением новых методов окраски (в электростатическом поле, гидродинамическим распылением и др.).

Благодаря проведению комплексов рассмотренных и других мероприятий, многие ремонтные предприятия в нашей стране и за рубежом добиваются не только восстановления, но и повышения послеремонтного ресурса отремонтированных

машин по сравнению с новыми.

Мероприятия по повышению долговечности

Подготовка и выполнение восстановительных процессов, используемых для «возрождения» изношенных деталей машин, оказывают решающее влияние на их послеремонтный ресурс в целом. Это происходит потому, что восстановлению подвергают обычно быстроизнашивающиеся детали, и работоспособность любой машины в первую очередь зависит от качества деталей, устанавливаемых в нее при ремонте.

В связи с повышением ресурса ремонтируемых машин (не менее 80% новых) увеличивается количество выбракованных деталей (примерно в 2 раза) и резко возрастают требования к качеству новых, прежде всего, восстанавливаемых деталей. Цехи (участки) восстановления изношенных деталей становятся наиболее важным, сложным энергонасыщенным и дорогим производством ремонтных предприятий.

Качество и долговечность восстанавливаемых деталей зависят главным образом от выбора рационального способа восстановления, применения упрочняющей технологии и получения заданного качества поверхности, особенно на стадии финишных операций обработки и упрочнения восстанавливаемых деталей.

Применяя различные технологические процессы восстановления, особенно металлопокрытиями и упрочняющую технологию, можно не только восстанавливать потерянные размеры деталей и первоначальные служебные свойства, но и значительно их повышать.

Примером этому может служить создание биметаллических поверхностей у новых деталей и значительное повышение их долговечности (хромированные поршневые кольца, наплавленные клапаны двигателей, рабочие органы сельскохозяйственных машин и др.).

6. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

Показатели качества и методы оценки уровня качества новой и отремонтированной сельскохозяйственной техники

По мере насыщения рынка теми или иными видами продукции и услуг только те из них найдут своего потребителя, которые отвечают требованиям, предъявленным потребителем к данной продукции. Без постоянного повышения качества невозможны достижение и поддержание эффективной экономической деятельности предприятия.

Под качеством Международная организация по стандартизации (ИСО) понимает совокупность свойств и характеристик продукции (или услуг), которая обеспечивает удовлетворение установленных или предполагаемых потребностей.

Каждый вид продукции (услуг) характеризуется своей номенклатурой показателей качества, которая зависит от назначения этой продукции. Применительно к новой сельскохозяйственной технике, выпускаемой заводами тракторного и сельскохозяйственного машиностроения, упомянутая в определении качества совокупность свойств включает в себя 10 групп единичных показателей качества (ПК).

Показатели назначения (ПНЗ) характеризуют свойства объекта, определяющие его основные функции, для выполнения которых он предназначен. К основным функциям трактора, например, относятся мощность двигателя и тяговое усилие, автомобиля – скорость и грузоподъемность, комбайна – пропускная способность молотилки и т.д.

Показатели надежности (ПН) характеризуют свойства объекта сохранять и восстанавливать его работоспособность в процессе эксплуатации. Потребителю нужны такие изделия, которые имеют высокие качественные показатели в момент их получения и стабильно сохраняют их в течение длительного времени.

Показатели технологичности (ПТ) характеризуют

приспособленность конструкции к ее изготовлению и эксплуатации. Первый из ПТ (приспособленность к изготовлению) называют производственной технологичностью, а второй (приспособленность главным образом к техническому обслуживанию и ремонту) – эксплуатационной технологичностью.

Показатели транспортабельности (ПТР) характеризуют приспособленность объекта к транспортировке. Здесь имеется в виду, например, не перемещение комбайна по полю при уборке зерновых, а его перевозка по железной дороге или при переезде на дальние дистанции. К ПТР относятся такие оценочные показатели, как средняя продолжительность (трудоемкость) подготовки объекта к транспортировке, его установки на средство перевозки, разгрузки из определенного вида транспорта. ПТР определяют для конкретного вида транспорта: железнодорожного, автомобильного, водного и воздушного.

Показатели стандартизации и унификации (ПСУ) характеризуют насыщенность объекта стандартными, унифицированными и оригинальными частями, а также уровень унификации с другими изделиями. К стандартным относятся составные части изделия, выпускаемые по государственным или отраслевым стандартам. Унифицированные составные части выпускают по стандартам предприятия или получают в готовом виде как комплектующие детали или сборочные единицы. Для примера можно привести степень унификации тракторов семейства «МТЗ» (базовая модель МТЗ-80): с МТЗ-80Х – 88%, с МТЗ-82 – 92%. Довольно высокая степень унификации достигнута за счет многократного применения таких агрегатов и сборочных единиц, как дизель, радиатор, сцепление, коробка передач, тормоза, электрооборудование и др. К оригинальным относятся части объекта, разработанные только для данного изделия.

Показатели безопасности (ПБП) характеризуют особенности конструкции объекта, обусловливающие безопасность обслуживающего персонала при его эксплуатации. Их учет необходим для обеспечения безопасных условий работы человека при наличии механических, электрических и тепловых воздействий, а также акустических

шумов. ПБП оценивают количественно и качественно. К количественным ПБП относятся давление срабатывания клапана-бустера гидрораспределителя, сопротивление изоляции токоведущих частей и т. д. Качественные характеристики ПБП – наличие ремней безопасности, аварийной сигнализации и т. д.

Эргономические показатели (ЭРП) характеризуют не отдельный объект, а систему человек-машина с точки зрения удобства и комфорта эксплуатации конкретного изделия. К ним относятся: соответствие конструкции машины размерам и форме тела человека, а также его силовым возможностям; соответствие изделия восприятию человека и т. п. Для повышения уровня ЭРП проводят работы по совершенствованию тракторных и комбайновых кабин. В новых кабинах тракторов МТЗ-80 и МТЗ-82 устанавливают отопительные устройства, сидения с унифицированным посадочным местом и др. Для комбайнов Дон-1500 разработана герметизированная кабина с хладоновым кондиционером, что способствует созданию комфортных условий работы комбайнера.

Экологические показатели (ЭКП) характеризуют еще более сложную систему человек-машина-среда с точки зрения уровня вредных воздействий на природу, возникающих в процессе эксплуатации машин. Учитываются поступления в природную среду сточных вод и других вредных выбросов с целью снижения содержания загрязняющих веществ в атмосфере, водоемах, реках и почве до количеств, не превышающих их предельно допустимые концентрации (ПДК). При количественной оценке ЭКП определяют вероятность выбросов в окружающую среду вредных частиц, газов, излучений и других загрязнений. Допускается также применение качественных характеристик, таких, как наличие очистных сооружений, пылеулавливателей и т. п.

Эстетические показатели (ЭСП) характеризуют рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного исполнения изделия. Они приобретают все большую значимость при контроле качества техники. ЭСП оценивает экспертная комиссия, состоящая из

квалифицированных специалистов с опытом работы в области художественного конструирования.

Патентно-правовые показатели (ПП) характеризуют степень обновления технических решений, использованных в конкретном объекте, их патентную защиту, а также возможность беспрепятственной реализации изделия за рубежом. Основные из них – патентная защита и патентная чистота.

Номенклатура показателей качества продукции ремонтных предприятий имеет некоторые особенности по сравнению с продукцией предприятий, выпускающих новые изделия. Они заключаются в том, что для продукции ремонтных предприятий показатели качества должны количественно характеризовать только те свойства продукции, которые могут измениться в результате воздействия факторов производственного процесса ремонта.

Так, в процессе ремонтных воздействий, как правило, не изменяется конструкция машины, а следовательно, и такие показатели качества, как технологичность, транспортабельность, показатели стандартизации и унификации, патентно-правовые показатели.

Все остальные показатели могут изменяться в процессе ремонта машин, следовательно, по их значению и необходимо оценивать уровень качества отремонтированных изделий.

Из числа показателей назначения для отремонтированных машин используют такие, которые определяют основные функции, для выполнения которых предназначены эти машины. Для тракторов, например, к таким показателям относят: номинальное тяговое усилие, номинальная мощность двигателя, максимальный вращающий момент на ВОМ, грузоподъемность навесной системы, давление в гидросистеме.

Указанные показатели оценивают у 100% изделий в процессе их ремонта во время контрольных испытаний и сдачи отремонтированной продукции работникам отдела технического контроля предприятия. Для этого сравнивают фактические показатели с нормативными, определенными техническими требованиями на ремонт.

Из числа единичных показателей надежности применительно к оценке качества отремонтированных машин

применяют: средний межремонтный ресурс $T_{ср}$; гамма-процентный межремонтный ресурс T_p; среднее число отказов за ресурс и за половину ресурса по группам сложности и т. д.

Кроме того, для оперативной оценки уровня безотказности используют показатели: среднее число отказов первой группы сложности за любую 1000 мото-ч; среднее число отказов второй группы сложности за первую и любую последующую тысячу моточасов; среднее число отказов третьей группы сложности за первую, вторую и третью тысячу моточасов.

Из числа эргономических показателей применяют: звуковое давление на рабочем месте водителя; усилие на штурвалах, рычагах и педалях управления; концентрацию вредных веществ, содержащихся в отработавших газах и зоне дыхания водителя; наличие остеклений, уплотнений и термогидроизоляции.

Из эстетических показателей используют показатели, характеризующие «товарный вид» отремонтированных изделий: наличие неокрашенных мест, подтеканий краски, некачественных сварочных швов, декоративных деталей, видимых повреждений, заводских табличек, клейм ОТК, пломб и заглушек.

Уровень качества по перечисленным единичным показателям контролируют путем сравнения значений показателей качества оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей, определяемых техническими требованиями на ремонт или новых машин.

Кроме сравнения значений единичных показателей качества при оценке уровня качества отремонтированных изделий допускается использование и других методов оценки, в том числе:

- по показателям дефектности отремонтированных изделий;
- по факторам, характеризующим ремонт.

При оценке уровня качества отремонтированных изделий по показателям дефектности используют коэффициент дефектности продукции $K_Д$. Его определяют как среднее взвешенное число дефектов, приходящихся на единицу продукции, т. е.:

$$K_Д = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a} m_i r_i ,$$

(137)

где n – число единиц изделий (выборка); a – число видов дефектов; m_i – число дефектов данного вида; r_i – коэффициент весомости каждого дефекта, определяемый экспериментальным путем или по стоимости устранения дефекта данного вида.

При оценке уровня качества отремонтированных изделий по факторам, характеризующим ремонт, учитывают качество технологической документации, технологического оборудования и оснастки, средств измерения и испытательного оборудования, а также качество труда лиц, ремонтирующих изделие.

Качество технологической документации оценивают путем ее полной или выборочной экспертизы по показателям, характеризующим: обеспечение требований, установленных нормативно-технической документацией; обоснованность и полноту установленных планов контроля и испытаний; соответствие номенклатуры технических документов, их оформления, порядка учета, хранения и внесения изменений требованиям стандартов.

Качество ремонтно-технологического оборудования определяют посредством выборочных измерений основных параметров оборудования и оснастки и их сравнения с паспортными данными, а также ознакомления с выполнением графиков технического обслуживания и ремонта этого оборудования.

Качество труда лиц, ремонтирующих изделия, оценивают так: выборочной проверкой соблюдения технологической дисциплины по операциям; измерением параметров деталей и сборочных единиц после их ремонта; анализом представленных предприятием данных по внутризаводскому браку и рекламациям; анализом действующих положений, приказов, распоряжений по материальному и моральному стимулированию; ознакомлением в цехах и на участках с культурой производства и организацией рабочих мест.

Система и организационные основы управления качеством продукции на ремонтных предприятиях

Под системой качества понимают совокупность организационной структуры, ответственности, процедур, процессов и ресурсов, обеспечивающую общее руководство качеством.

Маркетинг играет ведущую роль в определении требований, предъявляемых к качеству продукции. В результате маркетинговых исследований дается точное определение рыночного спроса в продукции или услугах, устанавливаются требования, предъявляемые потребителем к данной продукции или услуге в виде предварительного перечня технических требований, которые послужат основой для выполнения последующих работ по проектированию или обоснованию видов услуг.

Проектирование и разработка технических требований должны обеспечивать перевод на язык технических требований к материалам, продукции и процессам нужд потребителя, выраженных в виде краткого описания продукции или услуги. Результат этой работы – производство продукции или услуги, отвечающей требованиям потребителя, реализуемой по приемлемой цене и обеспечивающей предприятию удовлетворительный возврат вложенных средств.

В процессе проектирования должны быть предусмотрены периодическая оценка и анализ проекта на основных этапах его разработки по элементам, относящимся к требованиям потребителя, техническим требованиям на продукцию и требованиям к услуге, а также требованиям к производству.

По результатам периодического анализа в проект вносят необходимые изменения, которые отражают в технических требованиях и чертежах.

Периодически проводимая повторная оценка продукции должна подтверждать, что проект по-прежнему соответствует всем установленным требованиям. Данная оценка должна включать анализ требований потребителя и технические требования с учетом опыта, накопленного за время эксплуатации, анализа рабочих характеристик или новой технологии и новых методов. Система качества должна предусматривать использование опыта, накопленного в процессе производства и эксплуатации, и необходимость изменения проекта на основе такой обратной связи.

Материально-техническое снабжение непосредственно влияет на качество продукции и услуги ремонтно-обслуживающих предприятий, так как материалы, комплектующие детали, сборочные единицы и запасные части становятся частью выпускаемой продукции этих предприятий. Для обеспечения высокого качества поставок потребитель устанавливает тесные рабочие контакты и систему обратной связи с каждым поставщиком.

Программа качества поставок должна включать в себя следующие элементы:

- формирование четко определенных требований к заказам на поставку (типа, сортности поставляемых материалов), доведение их до сведения поставщика;
- оценку возможностей поставщика и его системы обеспечения качества поставляемых материалов и комплектующих изделий непосредственно на предприятии;
- заключение соглашения с поставщиком о методах проверки соответствия поставляемых материалов установленным требованиям;
- разработку с поставщиком системы и процедуры решения спорных вопросов, относящихся к качеству;
- разработку и внедрение методов входного контроля поставляемых изделий, обеспечивающих уверенность в том, что получение поставок контролируется надлежащим образом;
- регистрацию данных о качестве поставок при входном контроле, с тем чтобы обеспечить наличие ретроспективных данных оценки продукции поставщика и определить тенденции изменения ее качества.

Обеспечение качества продукции в процессе производства достигается путем систематических управляющих воздействий на ход производственных процессов, поставки, производственную среду и персонал.

Все производственные операции должны быть зафиксированы в соответствующих документах – технологических картах и рабочих инструкциях. Каждая единица производственного оборудования должна иметь рабочую инструкцию по ее эксплуатации, отражающую технические возможности и режимы работы этого оборудования, их соответствие стандартам,

регламентирующим качество выполняемой работы.

Система качества должна предусматривать периодическую проверку качества продукции, процессов, материалов производственной среды с целью минимизации последствий в результате допущенных ошибок или последствий в работе и максимизации эффективности.

В тех случаях, когда производственная среда (например, температура, влажность, чистота) или вспомогательные материалы и средства (вода, сжатый воздух, электроэнергия, химические продукты), используемые в производстве, имеют важное значение для качества продукции, они должны постоянно подвергаться управляющим воздействиям и проверкам, с тем чтобы обеспечить постоянство их взаимодействий на производство продукции.

Все технологическое оборудование, включая зажимные приспособления, испытательное оборудование, производственные стенды, периодически проверяют на точность. Всякие изменения в технологической оснастке и оборудовании, изменения в применяемых материалах и технологическом процессе надо отражать в технической документации.

Системой качества должна быть предусмотрена разработка порядка и методов приемочного контроля готовой продукции, обеспечивающего подтверждение соответствия продукции эксплуатационным требованиям и другим характеристикам качества. Выявленные дефекты и отклонения от нормы должны быть доведены до сведения заинтересованных подразделений, устранены, и после этого доработанную продукцию вновь контролируют или испытывают.

Порядок выполнения погрузочно-разгрузочных работ, складирования, упаковки и поставки также должен найти отражение в системе качества.

Механизм управления качеством в общем случае заключается в следующем. В результате изучения в процессе эксплуатации надежности и других показателей качества новых машин и состояния ремонтного фонда устанавливают плановые задания по качеству на отремонтированные машины.

После этого начинают конструкторскую и технологическую подготовку производства.

В процессе ремонтного производства и эксплуатации отремонтированных машин с определенной периодичностью постоянно сравнивают информацию о фактическом качестве с плановым заданием по качеству. При возникновении разницы между ними разрабатывают мероприятия. Они направлены на устранение причин, вызвавших отклонение фактического качества от запланированного.

Таким образом, под управлением качеством ремонта машин следует понимать установление, обеспечение и поддержание оптимального уровня качества при разработке технологии и производстве ремонта, хранении, транспортировке и эксплуатации машин, при систематическом контроле качества и целенаправленном воздействии на влияющие условия и факторы.

Под фактором в данном случае понимают причину или конкретную движущую силу, способную улучшить или ухудшить свойства продукции. К факторам относятся предметы труда, его средства и сам труд. Их соединение изменяет свойства материала или изделия таким образом, что они становятся способными удовлетворять определенные потребности.

При комплексном подходе к проблеме повышения качества ремонта к числу основных факторов, влияющих на показатели качества отремонтированных машин, относят: состояние ремонтного фонда, технологического оборудования, оснастки, инструмента, средств измерения и контроля, испытательного оборудования; качество запасных частей, комплектующих изделий и материалов; квалификацию кадров; организацию технологических процессов очистки, разборки, дефектации, восстановления деталей, комплектации, сборки, обкатки, испытания и окраски.

Под условием повышения качества понимаются обстоятельства или среда, в которой действуют влияющие на формирование качества факторы.

В определенных условиях фактор повышения качества может оказать наибольшее влияние на показатели качества ремонтируемой продукции при минимальных затратах. Иногда условия могут сложиться так, что они не способствуют полному воздействию фактора на повышение качества ремонта. Тогда

на улучшение качества затрачивают больше времени и средств. По масштабу воздействия условия могут быть частными или общими. К первым относятся условия, характерные для данного предприятия, ко вторым – условия для всех предприятий данного типа.

В число основных условий, способствующих проявлению факторов повышения качества ремонта машин, входят такие, как материальное и моральное стимулирование исполнителей за качество работы, взаимосвязь между ценой за ремонт и качеством отремонтированных изделий, организация труда.

Организационной основой управления качеством продукции и услуг является система стандартизации, включающая государственные, отраслевые стандарты (ГОСТы, ОСТы), технические условия (ТУ), технические требования (ТТ), руководящие технические материалы (РТМ), стандарты предприятий (СТП).

Для предприятий систему управления качеством продукции реализуют посредством разработки и внедрения стандартов предприятий и программ качества. Различают три типа стандартов предприятий: основной, общие и специальные.

Основной стандарт устанавливает главные принципы построения и требования к функционированию системы управления качеством ремонта на предприятии, цели, задачи и критерии эффективности управления качеством ремонта; организацию управления качеством; порядок разработки; утверждения, внедрения и контроля за функционированием системы, а также выполнение функции постоянного справочного материала при внедрении и поддержании системы в рабочем состоянии.

Общие стандарты предприятия определяют такие стороны деятельности предприятий, как организацию делопроизводства и контроль за исполнением документов, организацию работ по стандартизации, определение экономической эффективности системы качества.

Специальные стандарты определяют порядок функционирования подсистем в общей системе управления качеством для различных подразделений предприятия или отдельных служб. Стандарты предприятия утверждает

руководство предприятий.

Программы качества определяют цели в области качества, взаимосвязанные по срокам, ресурсам и исполнителям задания по повышению качества продукции и работ, а также мероприятия, обеспечивающие выполнение этих работ.

При разработке программы качества для ремонтно-обслуживающих предприятий обычно обращают внимание на следующие направления:

- сбор и анализ информации об отказах изделий в процессе эксплуатации;
- оценку показателей надежности отремонтированных изделий;
- оценку уровня качества поставляемых материалов, запасных частей и комплектующих изделий;
- выяснение причин претензий, поступающих от потребителей, и принятие мер по их предотвращению;
- концентрацию и специализацию производства, реконструкцию, техническое перевооружение предприятия;
- внедрение прогрессивных форм организации ремонта и обслуживания техники и развитие диспетчерской связи;
- замену и модернизацию оборудования и оснастки;
- механизацию и автоматизацию производственных процессов;
- метрологическое обеспечение производства;
- совершенствование технического контроля и испытания продукции, развитие самоконтроля исполнителей;
- обучение методам контроля качества работников всех уровней;
- обеспечение стабильности запланированного уровня качества;
- стимулирование труда работников с целью повышения качества продукции;
- оценку технологии производства и определение направлений ее улучшения;
- совершенствование организации труда, производства и управления на предприятии;
- обеспечение производства нормативно-технической, конструкторской и технологической документацией, развитие стандартизации;

- обучение, повышение квалификации кадров, сокращение их текучести и решение социальных вопросов;

- совершенствование взаимоотношений с поставщиками и потребителями;

- развитие прикладных исследований, проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для дальнейшего повышения качества и надежности техники.

В качестве первоочередных следует предусматривать мероприятия, направленные на устранение причин наиболее часто встречающихся отказов, вызывающих наибольшие затраты на их устранение и наибольшую продолжительность простоев.

Важнейшие элементы программы качества для ремонтно-обслуживающих предприятий – увеличение надежности отремонтированных машин, в частности, повышение межремонтного ресурса машин. В основу плановых заданий повышения качества ремонта должны быть положены данные систематического анализа качества выпускаемой продукции, в том числе данные проверок соответствия выпускаемой продукции установленным стандартам и техническим требованиям; результаты эксплуатационных обследований и всех видов испытаний, брака, рекламаций; предложения потребителей по повышению качества.

Исходными данными для планирования заданий и мероприятий служат также прогнозы технического развития предприятия, рекомендации научно-исследовательских институтов и проектно-технологических организаций на основании выполненных работ.

При разработке плановых заданий по повышению качества капитального ремонта машин обычно используют нормативы надежности (долговечность и безотказность) для новых машин и их составных частей, умноженные на соответствующий коэффициент.

Планируемые показатели качества продукции обобщает и систематизирует служба технического контроля предприятия совместно с технической службой.

Достижения планируемых показателей качества продукции проверяет комиссия, возглавляемая руководителем службы технического контроля с привлечением соответствующих служб

предприятия. Результаты проверки оформляют актом, который служит основанием для составления отчета о выполнении планируемых показателей.

Технический контроль качества продукции

Технический контроль – один из важнейших элементов системы управления качеством продукции. Его главная цель – предупредить производство и предотвратить выпуск продукции, не соответствующей требованиям нормативно-технической документации.

Эффективность и качество проведения контроля во многом зависят от организации проведения контрольных работ.

Виды контроля. Применяемый на ремонтных предприятиях контроль за качеством ремонта можно классифицировать по следующим видам:

- стадиям технологического процесса – входной, операционный, приемочный и инспекционный;
- степени охвата – сплошной и выборочный;
- времени проведения – летучий, непрерывный и периодический.

Входной контроль – это контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику и предназначаемой для использования при ремонте или эксплуатации продукции. Такому контролю подвергают запасные части, материалы и комплектующие изделия.

Операционный контроль – это контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения технологической операции.

Приемочный контроль – это контроль продукции, по результатам которого принимаются решение о ее пригодности к использованию.

Инспекционный контроль – это контроль, проводимый специально уполномоченными лицами с целью проверки эффективности ранее выполненного контроля.

Сплошной контроль – контроль каждой единицы продукции в партии.

Выборочный контроль – контроль, при котором качество партии изделий оценивают по результатам проверки одной или нескольких выборок.

Летучий контроль – контроль, проводимый в случайное время.

Непрерывный контроль – контроль, при котором информация о контролируемых параметрах поступает непрерывно.

Периодический контроль – контроль, при котором информация о контролируемых параметрах поступает через установленные интервалы времени.

Состав службы технического контроля. Качество выпускаемой продукции на ремонтных предприятиях контролируется работниками службы технического контроля. В ее функции входят: эффективный контроль качества и приема продукции на всех стадиях производства; проведение испытаний продукции на соответствие нормативно-технической документации; контроль соблюдения технологической дисциплины и состояния средств технологического оснащения производственного процесса на всех стадиях производства; оценка качества труда исполнителей и подразделений на основе результатов проведения технического контроля; сбор и анализ информации о качестве продукции в сфере эксплуатации; принятие мер по рекламациям; своевременное обнаружение брака; предотвращение дальнейшей обработки бракованных изделий; установление причин появления брака и принятие мер по их устранению.

Анализ результатов проверок качества ремонта, проводимых ГосНИТИ, показывает, что недостаточный уровень в работе службы технического контроля – одна из основных причин того, что выпускаемые из ремонта машины имеют значительное число дефектов.

От количественного и качественного состава службы технического контроля и организации контрольных постов в значительной степени зависит ее эффективность.

Трудоемкость контрольных операций, выполняемых службами технического контроля, нормируют, как и все остальные технологические операции, и включают в трудоемкость ремонта изделий. Возложение на работников службы технического контроля обязанностей по выполнению других технологических операций не допускается.

Перевод отдельных лиц на самоконтроль, внедрение системы бездефектного изготовления продукции и проведение других мероприятий по повышению качества ремонта не снижают ответственность служб технического контроля за оценку соответствия продукции установленным требованиям и не освобождают их от выполнения функции контролирующего органа.

Независимо от указанных мероприятий служба технического контроля должна контролировать продукцию в той мере, в какой это необходимо для гарантии выпуска высококачественной продукции.

Число работников, входящих в службу технического контроля, рассчитывают исходя из трудоемкости контрольных операций.

Общее число контрольных мастеров:

$$P_{км} = \left(\sum_{1} K_i t_i b_i N a \right) / T_д , \qquad (138)$$

где n – число наименований объектов контроля; K_i – число контрольных операций по каждому объекту; t_i – трудоемкость i-й контрольной операции в часах рабочего времени; b_i – коэффициент повторяемости i-й операции; N – программа выпуска n-го объекта; a – коэффициент, учитывающий время на оформление документов и другие затраты; $T_Д$ – действительный фонд времени контроля, ч.

Значения K_i, t_i, и b_i берут из ведомости операций технического контроля.

В соответствии с существующими ныне положениями число работников службы технического контроля определяют, исходя из условия: один контрольный мастер на 15...20 основных производственных рабочих.

Служба технического контроля входит в число основных подразделений предприятия. Поэтому оплату мастеров, рабочих и контролеров приравнивают к оплате соответствующих работников производственных подразделений. Более того, высококвалифицированным рабочим-контролерам, постоянно связанным с контролем и приемкой наиболее сложной и ответственной продукции, в установленном порядке присваивают квалификационные разряды на единицу выше по сравнению с разрядами рабочих,

занятых изготовлением продукции.

Статистические методы контроля. Один из путей повышения эффективности работы подразделений ОТК – внедрение статистического контроля, особенно входного статистического контроля комплектующих изделий, запасных частей, полуфабрикатов, материалов, а также приемочного контроля при приемке готовой продукции или полуфабрикатов в процессе обработки. Под статистическими методами контроля понимают контроль качества продукции, проводимый на основании теории вероятности и математической статистики.

Сущность статистических методов контроля заключается в том, что из подконтрольной партии N объектов непосредственно проверяют только некоторую ее часть n, называемую выборкой.

В зависимости от числа или доли годных в этой выборке деталей всю партию принимают (считают годной) или не принимают (бракуют).

Применяют статистический приемочный контроль по количественному признаку и статистический приемочный контроль по альтернативному признаку.

Контроль по количественному признаку заключается в том, что у единицы продукции измеряют значения контролируемого параметра, вычисляют среднее арифметическое значение и оценивают его отклонение от одной (верхней или нижней) или двух заданных границ. Эти отклонения сравнивают с заранее установленными контрольными нормативами и по результатам сравнения принимают решение о соответствии или несоответствии продукции установленным требованиям.

Контроль по альтернативному признаку состоит в том, что все изделия в выборке разбивают на две группы: годные и дефектные. Годность партии оценивают по доле дефектных изделий в общем числе проверенных.

Приемочный уровень качества определяют в зависимости от значимости дефектов. С этой целью возможные дефекты деталей классифицируют по трем категориям: критические, значительные и малозначительные.

Под критическими понимают дефекты, при наличии которых использование продукции по назначению невозможно.

Значительными называют дефекты, которые

существенно влияют на долговечность продукции. Малозначительными считаются дефекты, которые существенно не влияют на использование продукции и ее долговечность.

План контроля деталей и сборочных единиц устанавливают, исходя из следующего. По параметрам изделий, несоблюдение которых ведет к критическому дефекту, надо применять сплошной контроль. По всем другим параметрам используют статистический контроль с приемочным уровнем качества (дефектности), равным 1,4 или 10% в зависимости от значимости дефекта.

Существует два типа планов контроля: одноступенчатый – решение о принятии партии на основании проверки одной выборки; многоступенчатый – по результатам контроля $K_i \geq 2$ выборок, причем число последних устанавливают заранее.

При одноступенчатом приемочном контроле партии деталей N, содержащей M дефектных деталей, делают случайную выборку объемом в n деталей. Партию принимают, если в выборке оказывается не более C дефектных деталей. В противном случае ее бракуют.

Многоступенчатый приемочный контроль выполняют так. Из партии деталей N случайным образом отбирают выборку объемом n_1:

- если в выборке число дефектных деталей n_1 не превышает приемочного числа C_1, то партию принимают;
- если n_1 оказывается не менее браковочного уровня d_1 ($d_1 > C_1$), то партию бракуют;
- если n_1 попадает в интервал $C_1 < m_1 < d_1$, то принимают решение о взятии второй выборки объемом n_2.

Для второй выборки устанавливают нормативы C_2 и d_2, с которыми сравнивают результаты контроля:

- если $m_1 + m_2 \leq C_2$, то партию принимают;
- если $m_1 + m_2 \geq d_2$, то партию бракуют;
- если $m_1 + m_2 < d_2$ и $m_1 + m_2 > C_2$, то назначают третью выборку и т.д.

При практическом использовании статистического контроля по альтернативному признаку для определения браковочных и приемочных чисел и других показателей разработаны специальные таблицы. Применение этого метода рассмотрим на входном контроле качества запасных частей.

Входной контроль качества запасных частей. Опыт контроля запасных частей показывает, что значительная их часть имеет отклонения от чертежей и стандартов. Это служит одной из причин снижения ресурса отремонтированных машин и заставляет потребителя вводить входной контроль.

Входной контроль соответствия запасных частей чертежам и техническим требованиям – вынужденная мера по обеспечению высокого качества ремонта.

Если число запасных частей в партии, поступившей на предприятие, менее 100, то их подвергают сплошному контролю. При поступлении на предприятие более 100 изделий по одному сопроводительному документу входной контроль выполняют статистическим методом по альтернативному признаку.

План контроля по каждой детали определяют по следующим показателям: объему контролируемой партии N, приемочному уровню дефектности q_1, объему первой выборки n_1, объему второй выборки n_2, приемочному числу первой выборки C_1, приемочному числу первой и второй выборок C_2. Установлены следующие приемочные уровни дефектности по отдельным параметрам качества деталей:

по точности обработки 1,0 и 4,0% (таблица 20);

по параметрам шероховатости 1,0 и 4,0%;

по физико-механическим параметрам продукции (твердости, упругости, глубине закаленного слоя и т. д.) 4,0%;

по химическому составу 4,0%;

по герметичности 1,0%;

по отклонению от заданной формы и расположению поверхностей 4,0%;

по другим свойствам 4,0%.

Таблица 20 – Параметры продукции, выраженные линейными размерами и допусками

Номинальные размеры, мм	Допуски, мм, в зависимости от уровня дефектности, %	
	1	4

Свыше 6 до 10	До 0,022	Свыше 0,022
Свыше 10 до 18	До 0,027	Свыше 0,027
Свыше 18 до 30	До 0,033	Свыше 0,038
Свыше 30 до 50	До 0,039	Свыше 0,039
Свыше 50 до 80	До 0,046	Свыше 0,046
Свыше 80 до 120	До 0,054	Свыше 0,054
Свыше 120 до 180	До 0,063	Свыше 0,063
Свыше 180 до 250	До 0,072	Свыше 0,072
Свыше 250 до 315	До 0,081	Свыше 0,081
Свыше 315 до 400	До 0,089	Свыше 0,089
Свыше 400 до 500	До 0,097	Свыше 0,097
Свыше 500 до 630	До 0,11	Свыше 0,11

В зависимости от объема партии и приемочного уровня дефектности определяют план контроля, устанавливают объем первой и второй выборок и приемочное число первой и второй выборок по таблице 21.

Порядок проведения входного контроля качества запасных частей заключается в следующем.

1. По сопроводительному документу изготовителя продукции находят объем поступившей партии деталей.

2. Определяют 1...5 признаков продукции, по которым будут проводить входной контроль. Допускается контроль по любому признаку продукции.

Пример статистического приемочного контроля. Требуется проверить качество партии, состоящей из 300 гильз цилиндров двигателя типа СМД.

Качество гильз проверяют по следующим признакам: диаметру посадочного пояска; внутреннему диаметру гильзы; шероховатости внутренней рабочей поверхности.

Контролируют качество гильз по диаметру посадочного пояска. Он должен быть равен $135^{-0,05}_{-0,09}$. По таблице 21 находят приемочный уровень дефектности. Для диаметра 135 мм и допуска 0,04 мм q_1 = 1,0%.

Таблица 21 – Показатели плана контроля в зависимости от объема выборки и приемочного уровня дефектности

Приемоч		Число изделий в партии

ный уровень дефектности, %	Показатель плана контроля	100…199	200…299	300…499	500…799	1200…1299	1300…1399
1	Объем выборки:						
	n_1	20	25	35	50	75	100
	n_2	40	50	70	100	175	200
	Приемочное число:						
	C_1	0	0	1	1	2	2
	C_2	1	2	2	3	5	5
4	Объем выборки:						
	n_1	10	13	20	25	35	50
	n_2	20	26	40	50	70	100
	Приемочное число:						
	C_1	0	0	1	1	2	3
	C_2	2	4	4	5	6	9

По таблице 21 в соответствии с установленным уровнем дефектности определяют показатели плана контроля: объемы выборки и приемочные числа.

При q_1 = 1,0% и объеме партии N = 300 объемы выборки n_1 = 35, n_2 = 70 и приемочные числа C_1 = 1, C_2 = 2.

Отбирают из партии случайную выборку из 35 гильз. Назначают средства измерения – предельную контрольную скобу.

Определяют качество каждой из 35 гильз по диаметру посадочного пояска. Пусть по диаметру посадочного пояска две гильзы оказались дефектными, т. е. d_1 = 2. Контроль по этому признаку можно было бы закончить, если бы $d_1 = C_1$, т. е. дефектной оказалась бы одна гильза. Так как в данном примере d_1 = 2 более C_1, но не более C_2, качество партии гильз по посадочному пояску считают невыявленным.

Далее берут случайную выборку n_2 = 70, т. е. дополнительно отбирают 35 гильз. Определяют качество гильз по посадочному пояску второй выборки из 35 гильз. Предположим, что во второй выборке ни одна гильза не оказалась забракованной, т. е. d_2 = 0.

Так как общее число дефектных гильз $d_1 + d_2 = C_2 = 2$, принимают решение: партию гильз по диаметру посадочного пояска признают годной и дальнейший контроль по этому признаку прекращают. По остальным признакам контролируют по той же схеме.

Обеспечение стабильности качества продукции

Свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготовляемой продукции в заданных пределах в течение некоторого времени называется стабильностью.

Стабильность качества продукции достигается следующими способами:

- периодической проверкой оборудования и оснастки на технологическую точность и своевременным проведением планово-предупредительного ремонта этого оборудования;
- обеспечением и поддержанием технологической дисциплины;
- периодической оценкой качества отремонтированных изделий.

Проверка оборудования и оснастки на технологическую точность. Под технологической точностью оборудования понимают его способность в оснащенном состоянии обеспечивать в течение установленного периода времени соответствие поля рассеивания значений показателя качества заданному полю допуска и его расположению.

Стабильность качества может быть достигнута за счет систематической проверки оборудования.

Проверке на технологическую точность подлежит все оборудование, занятое на выполнении базовых, точных, отделочных и финишных операций. Оборудование с установленными на нем приспособлениями проверяют обязательно в комплексе по тем параметрам, которые непосредственно определяют точность выполнения закрепленных за станком операций.

Технологическую точность оценивают по коэффициенту точности

$$K_т = \omega / \delta,$$

(139)

где ω – фактическое поле рассеивания или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленную наработку, мм; δ – допуск на контролируемый параметр по технической документации, мм.

При нормальном законе распределения контролируемого параметра

$$\omega = 6\sigma,$$

(140)

где σ – среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра обрабатываемой детали, мм.

Технологическое оборудование на этапе технологической подготовки производства, при замене, модернизации и его ремонте выбирают по коэффициенту запаса точности

$$\psi = \left(1 - K_T\right)100.$$

(141)

Для стабильного качества обработки восстанавливаемых деталей коэффициент запаса точности токарных, фрезерных, расточных, сверлильных и других станков, выполняющих точные и финишные операции, должен быть $\psi \geq 25\%$.

Параметр ω находят проведением микрометража деталей, регламентирующих ресурс отремонтированных машин (агрегатов).

Технический отдел предприятия ежегодно определяет перечень оборудования, подлежащего проверке на технологическую точность, и составляет график проверки. Последний согласовывают со службой технического контроля.

Способы проведения проверок оборудования на технологическую точность разрабатывают с учетом конструктивных особенностей обрабатываемых деталей и станка (приспособления) и установленных норм технологической точности. Результаты проверки оборудования на технологическую точность заносят в карту контроля технологической точности оборудования и приспособлений.

В случае неудовлетворительных результатов проверки оборудования на технологическую точность и невозможности

восстановления точности регулировочными работами это оборудование отправляют в ремонт.

При невыполнении в установленные графиком сроки проверки оборудования на технологическую точность или при неудовлетворительных результатах проверки отдел технического контроля прекращает прием продукции с данного оборудования и ставит об этом в известность руководство предприятия.

Поддержание технологической дисциплины. Утвержденный технологический процесс обязателен для выполнения работниками предприятия. За него несут ответственность руководство цехов, участков, службы технического контроля и непосредственные исполнители. Контроль за соблюдением технологической дисциплины проводят с целью проверки выполнения требований конструкторской и технологической документации. Он включает проверку: наличия и состояния этой документации в цехе, на участках и рабочих местах; соответствия технологических процессов требованиям нормативно-технической документации; точности оборудования, оснастки, контрольно-измерительных приборов; знаний мастерами, рабочими и контрольными исполнителями требований нормативно-технической документации; чистоты и порядка на рабочих местах.

Особое внимание уделяется операциям, несоблюдение которых приводит к браку и дефектам, характерным для ремонтного производства:

- разборочным – выполнение установленной последовательности операций, отсутствие повреждения деталей, соблюдение требований по неразукомплектованию соединений;
- очистки – соблюдение режимов (давления, температуры), концентрации и чистоты моющих растворов, а также продолжительности очистки;
- дефектации – наличие необходимых средств измерения и контроля, правильность выбраковки и маркировки;
- восстановления и слесарно-механической обработки – соответствие требованиям нормативно-технической документации режимов восстановления, размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, выполнение требований по шероховатости и твердости поверхностей;

- сборки, регулировки и испытаний сборочных единиц и агрегатов – правильность комплектования деталей по размерным группам, массе и регулировке зазоров, усилий затяжки, натяжений ремней, цепей и т. д., соблюдение режимов обкатки и испытаний (нагрузки, давления, температуры рабочей жидкости, частоты вращения, продолжительности), балансировки и проверки герметичности;

- окраски – соблюдение требований к подготовке поверхностей для нанесения лакокрасочных покрытий, используемым материалам и режимам окраски и сушки.

Особое внимание обращают на выполнение операций, обеспечивающих соответствие отремонтированных изделий основным требованиям безопасности к тракторам и самоходным машинам, прошедшим ремонт или техническое обслуживание. К ним относятся: отсутствие щелей в дверных и оконных проемах, а также подтеканий огнеопасных жидкостей, шума и вибрации, наличие уплотнений около рычагов управления, исключающих проникновение пыли и газов в кабину, предупреждающих надписей и окраски в предусмотренных конструкцией местах, блокирующих устройств и т.д.

В случае нарушения технологической дисциплины служба технического контроля может принять решение о запрещении выполнения отдельных операций или прекращении приемки деталей до устранения отклонений.

Контроль за соблюдением технологической дисциплины на рабочих местах проводят на основании квартальных графиков, которые составляются технологами, согласовываются с начальником отдела технического контроля и утверждаются главным инженером предприятия.

Соблюдение технологического процесса на рабочем месте проверяется комиссией в составе представителей службы технического контроля и измерительной лаборатории, технолога участка и мастера производственного подразделения. Повседневный оперативный контроль за соблюдением технологической дисциплины возлагается на мастеров производственных подразделений и контролеров. Ежемесячно технический отдел представляет главному инженеру отчет о соблюдении технологической дисциплины во всех производственных подразделениях.

Контроль стабильности качества отремонтированных изделий. Для контроля стабильности качества изделий и их соответствия техническим требованиям проводят периодическую оценку их качества не реже одного раза в полугодие. Она предусматривает: контроль соответствия технической и конструкторской документации на ремонт требованиям нормативно-технической документации; разборку и техническую экспертизу партии отремонтированных изделий с целью проверки их соответствия техническим требованиям на ремонт; анализ состояния работ по обеспечению качества продукции; кратковременные испытания отремонтированных изделий.

Особое внимание обращают на соблюдение технологической дисциплины по основным технологическим процессам, от которых зависит качество ремонта.

Периодическую оценку качества проводит служба отдела технического контроля предприятия. Число объектов для технической экспертизы принимают таким: не менее трех сборочных единиц или агрегатов и не менее пяти деталей (комплектов одного наименования).

Оценка соблюдения технологической дисциплины по предприятию в целом рассматривается как неудовлетворительная, если параметры процессов не соблюдаются более чем в 10% проверенных случаев.

Оценка качества труда и материальное стимулирование

Чтобы повысить ответственность и заинтересовать работников в выпуске продукции высокого качества, необходимо оценивать их деятельность, что служит основой при моральном и материальном стимулировании.

Качество труда оценивают путем выборочной проверки соблюдения технологической дисциплины по операциям; анализа данных о внутризаводском браке и рекламациях; измерения параметров деталей, сборочных единиц и машин в целом после их ремонта; анализа выполнения планов повышения качества ремонта и мероприятий по моральному и материальному стимулированию за повышение качества.

Для оценки качества труда исполнителей (рабочих, инженерно-технических работников и служащих) вводят показатель – коэффициент качества труда K_{TP}. Его определяют из выражения

$$K_{TP} = 1 + \sum_{i=1}^{n} K_{ni} - \sum_{j=1}^{m} K_{cj}, \quad (142)$$

где K_{ni} – повышающий показатель коэффициента качества труда; K_{cj} – снижающий показатель коэффициента качества труда; n и m – число проявлений инициативы и упущений в работе.

Примерные значения K_{ni} и K_{cj} для рабочих, ИТР, служащих представлены в таблицах 22-24.

Таблица 22 – Классификатор показателей, снижающих и повышающих качество труда рабочих

Шифр показателя	Показатель	Значение коэффициента
	Возврат продукции с предъявления:	
K_{c1}	первого	0.05
K_{c2}	второго	0,12
K_{c3}	третьего	0,18
K_{c4}	За каждый день задержки исправления брака (допускается до 3 дней с момента возврата)	0,20
K_{c5}	Наличие рекламации по вине рабочего	0,35
K_{c6}	Нарушение технологической дисциплины	0,07
K_{c7}	Неправильная информация о ходе выполнения задания	0,25
K_{c8}	Нарушение правил внутреннего распорядка	0,08
K_{c9}	Невыполнение распоряжений руководства	0,30
K_{c10}	Нарушение правил технической и пожарной безопасности	0,15
K_{c11}	Нарушение чистоты рабочего места и промышленной санитарии	0,10
K_{c12}	Употребление алкоголя, прогул без уважительной причины	1,00

K_{n1}	Овладение смежными профессиями и работа на других рабочих местах в силу производственной необходимости	0,05
K_{n2}	Внедрение в производство приспособлений или технологических операций, повышающих производительность труда и качество ремонта (за каждое внедрение)	0,1

Таблица 23 – Классификатор показателей качества труда ИТР и служащих

Категория ИТР и служащих	Показатель	Норматив повышения коэффициента качества труда K_{ni}
Инженерно-технические работники ремонтной мастерской	Отсутствие замечаний в соблюдении технологической и трудовой дисциплины, правил техники безопасности и производственной санитарии	0,10
	Повышение уровня ритмичности производства	0,10
	Своевременное обеспечение производства защитными приспособлениями, инструментом, инвентарем, ма-териалами, запасными частями, контроль за их экономным расходованием	0,10
	Снижение по сравнению с предыдущим периодом числа принятых рекламаций	0,30
	Наличие реализованных предложений по повышению ресурса в отчетном периоде	0,40
Работники службы технического контроля	Снижение уровня рекламаций по качеству продукции	0,30
	Отсутствие фактов несоблюдения технологической дисциплины	0,10
	Наличие реализованных предложений по повышению качества продукции в отчетном периоде	0,20
	Отсутствие замечаний по оценке качества труда рабочих и ведения учета по этому вопросу	0,10
	Наличие реализованных предложений по оснащению межоперационных контрольных постов и организации службы технического контроля в отчетном периоде	0,30

Таблица 24 – Классификатор нарушений показателя качества труда ИТР и служащих

Шифр показа-теля	Нарушение	Норматив снижения коэффициента качества труда
K_1	Наличие признанной рекламации или претензии	0,15
K_2	Выполнение работ по недействительной технической документации	0,15
K_3	Неисправность оборудования, оснастки и инструментов	0,10
K_4	Несвоевременное составление или нарушение графика проверки соблюдения технологической дисциплины	0,05
K_5	Несвоевременное выполнение плана мероприятий по научной организации труда	0,05
K_6	Несвоевременное или некачественное выполнение планово-предупредительного ремонта оборудования, оснастки и инструментов	0,05
K_7	Нарушение сроков проверки оборудования, оснастки на технологическую точность	0,10

ЧАСТЬ II. ПРАКТИКУМ

Практическая работа №1

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОПЫТНОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Цель работы:

Освоить методику обработки опытной информации по надежности машин для определения показателей надежности.

Оснащение рабочего места:

Микрометры, нутромеры, комплект поршневых пальцев и поршней двигателя ЗМЗ-53.11. Технические требования на дефектацию и ремонт двигателя.

Порядок выполнения работы:

1. Выполненить необходимые замеры с помощью соответствующего инструмента по указанию преподавателя (40 мин).
2. Составить сводную таблицу исходной информации в порядке возрастания показателя надежности (вариационный ряд) (15 мин).
3. Составить статистический ряд опытной информации (30 мин).
4. Определить среднее значение и абсолютные характеристики рассеивания значений показателя надежности (дисперсии и среднеквадратического отклонения) (20 мин).
5. Проверить информацию на выпадающие точки (15 мин).
6. Графическое изображение опытной информации: построение гистограммы, полигона и кривой накопленных опытных вероятностей показателя надежности (40 мин).
7. Определить относительный показатель надежности – коэффициент вариации (10 мин).
8. Выбрать теоретический закон распределения (10 мин).
9. Проверить совпадение опытных и теоретических законов распределения показателя надежности по критериям согласия (30 мин).

10. Определить доверительные границы рассеивания значений показателя надежности и наибольших возможных ошибок расчета (15 мин).

Измерение размеров полученных деталей

Измерение размеров деталей и величины износа производится с помощью инструмента по соответствующей методике, предусмотренной ГОСТ 18509-80 и представленной на рисунке 1.1.

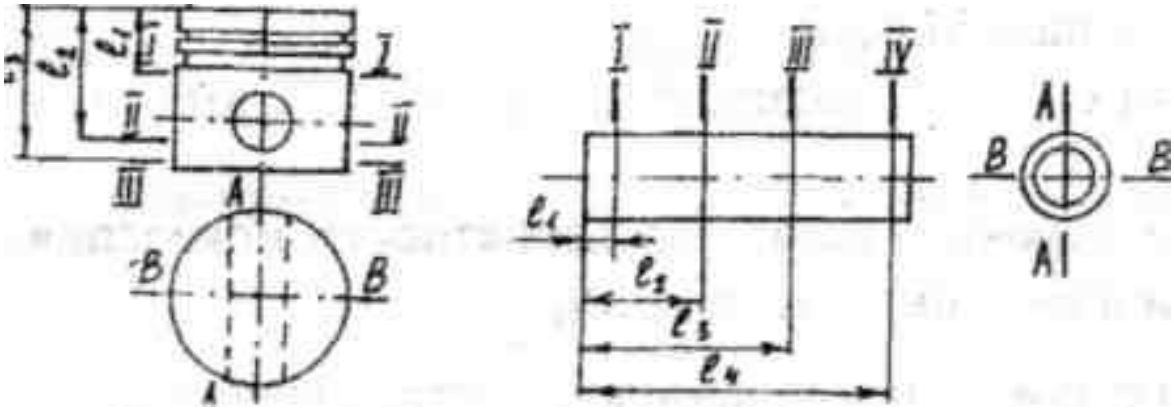


Рисунок 1.1 – Методика определения износов поршня и поршневого пальца

Наружный диаметр поршня следует измерять в двух плоскостях не менее чем в трех сечениях, в том числе – в зоне минимального зазора между юбкой поршня и цилиндром или гильзой цилиндра. Расположение сечений – по технической документации на двигатель, утвержденной в установленном порядке.

Погрешность измерения не должна быть более + 0,005 мм.

Наружный диаметр поршневого пальца следует измерять в двух плоскостях и четырех сечениях. Погрешность измерения не должна превышать ± 0,002 мм.

Составление сводной таблицы исходной информации в порядке возрастания показателя надежности (вариационный ряд).

Это необходимо для большего удобства дальнейшей обработки полученной в ходе испытаний информации.

Составление статистического ряда

Для построения статистического ряда вся информация разбивается на n интервалов. Применительно к показателям надежности сельскохозяйственной техники, количество интервалов n должно быть в пределах n = 6...12. Все интервалы должны быть одинаковыми, прилегать друг к другу и не иметь разрывов.

Начало первого интервала определяется с таким расчетом, чтобы начальная строка информации находилась примерно на его середине.

Число интервалов n статистического ряда определяют по формуле

$$n = \frac{t_k - t_{см}}{A}, \qquad (1.1)$$

где t_k – конечная точка информации; $t_{см}$ – величина смещения или расстояние от нуля до начального значения вариационного ряда информации; A – цена интервала.

Статистический ряд составляется обычно в виде таблицы из четырех строк:

в 1-й строке указывают границы каждого интервала в единицах показателя надежности;

во 2-й строке – количество случаев (частота m_i) в каждом интервале;

в 3-й строке – опытную вероятность появления показателя надежности в каждом интервале P_i;

в 4-й строке – накопленную опытную вероятность $\sum_{1}^{n} Pi$.

Опытная вероятность P_i определяется по формуле

$$Pi = \frac{m_i}{N}, \qquad (1.2)$$

где m_i – число случаев появления показателя надежности в каждом интервале; N – повторность информации.

В качестве примера рассмотрим статистический ряд информации по доремонтному ресурсу двигателя СМД-22 (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Статистический ряд информации

Интервал (тыс. мото-ч)	1.0...2,0	2,0...3,0	3,0...4,0	4,0...5,0	5,0...6,0	6,0...7,0
Частота m_i	2	4	25	28	10	1
Опытная вероятность P_i	0,03	0,06	0,36	0,40	0,14	0,01
$\sum_1^n Pi$	0,03	0,09	0,45	0,85	0,99	1,00

Определение среднего значения и абсолютных характеристик рассеивания значений показателя надежности (дисперсии и среднеквадратичного отклонения)

Среднее арифметическое значение показателя надежности $\bar{t}$ определяется по формуле

$$\bar{t} = \frac{\sum_1^N t_i}{N}, \qquad (1.3)$$

где N – повторность информации; t_i – значение i-го показателя надежности.

При наличии статистического ряда среднее значение $\bar{t}$ определяется по формуле

$$\bar{t} = \sum_1^n t_{ic} P_i, \qquad (1.4)$$

где n – количество интервалов в статистическом ряду; t_{ic} – значение середины i-го интервала; P_i – опытная вероятность i-го интервала.

Наиболее распространенная характеристика рассеивания показателей надежности, дисперсия D, определяется по выражению

$$D = \frac{\sum_1^N (t_i - \bar{t})^2}{N-1}. \qquad (1.5)$$

Еще одна важнейшая характеристика рассеивания, среднеквадратическое отклонение, определяется по выражению

$$\sigma = \sqrt{D}\,, \tag{1.6}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение.

При наличии статистического ряда среднеквадратическое отклонение определяется по уравнению

$$\sigma = \sqrt{\sum_{1}^{n}(t_{ic} - \bar{t})^2 P_i}, \tag{1.7}$$

где t_{ic} – середина *i*-го интервала; P_i – опытная вероятность *i*-го интервала; n – число интервалов.

Проверка информации на выпадающие точки

Проверка информации на выпадающие из общего закона распределения точки может быть проведена по закону

$$\bar{t} \pm 3\sigma\,, \tag{1.8}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение.

Точки или значения того или иного показателя надежности, которые не входят в этот интервал, являются ошибочными.

Графическое изображение опытной информации

Графическими изображениями опытной информации являются гистограмма, полигон и кривая накопленных опытных вероятностей показателя надежности.

Методика построения данных графических характеристик случайной величины представлена на рисунке 1.2.

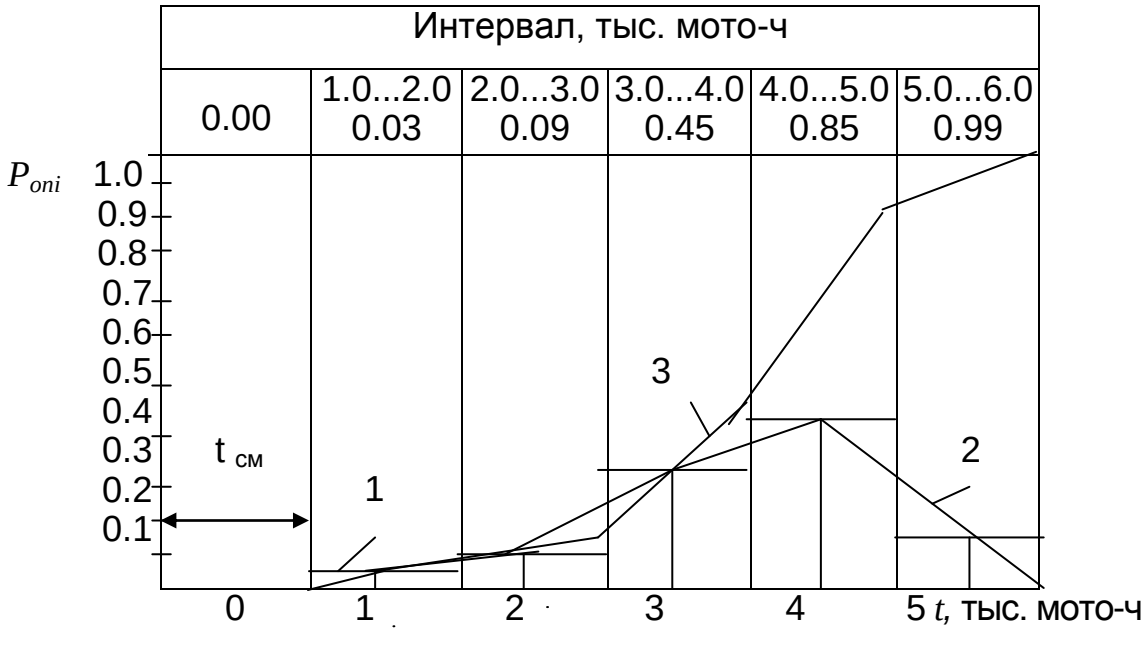


Рисунок 1.2 – Графическое изображение опытной информации: 1 – гистограмма; 2 – полигон; 3 – кривая накопленных опытных вероятностей показателя надежности $\sum_{1}^{n} P_{oni}$

По оси абсцисс всех графиков откладывается в масштабе значение показателя надежности t, а по оси ординат – частота или опытная вероятность у гистограммы и полигона и накопленная опытная вероятность у кривой накопленных опытных вероятностей.

Определение относительного показателя рассеивания случайной величины – коэффициента вариации

Коэффициент вариации v определяют по формуле

$$v = \frac{\sigma}{\bar{t}}, \tag{1.9}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение; $\bar{t}$ – среднее значение показателя надежности.

При наличии смещения $t_{см}$ коэффициент вариации определяется с помощью выражения

$$v = \frac{\sigma}{\bar{t} - t_{см}}. \tag{1.10}$$

Выбор теоретического закона распределения

Применительно к показателям надежности машин, эксплуатируемых в сельском хозяйстве, обычно используются закон нормального распределения и закон распределения Вейбулла (экспоненциальный закон и закон Релея являются частными случаями закона Вейбулла).

Окончательный выбор закона распределения производится по величине коэффициента вариации. Если $v \leq 0{,}33$ – закон нормального распределения, а если $v > 0{,}33$, то выбирается закон Вейбулла.

Проверка совпадения опытных и теоретических законов распределения показателя надежности по критериям согласия

Применительно к показателям надежности сельскохозяйственной техники чаще используются критерии согласия Пирсона χ^2 или Колмогорова.

Рассмотрим критерий Пирсона.

$$\chi^2 = \sum_1^n \frac{(m_{oni} - m_{mi})^2}{m_{mi}}, \quad (1.11)$$

где n – число интервалов в статистическом ряду; m_{oni} – опытная частота (количество случаев) в i-м интервале; m_{mi} – теоретическая частота в i-м интервале.

$$m_{mi} = N\left[F(t_{i+1}) - F(t_i)\right], \quad (1.12)$$

где N – общее количество значений показателя надежности; $F(t_{i+1})$ – значение интегральной функции $F(t)$ в конце того или иного интервала.

$$F(t) = F(t_{i+1}) = F\left(\frac{t_{ik} - \bar{t}}{\sigma}\right), \quad (1.13)$$

$$t = t_{i+1} = \frac{t_{ik} - \bar{t}}{\sigma},$$

где t_{ik} – значение показателя надежности в конце i-го интервала; $\bar{t}$ – среднее значение показателя надежности; σ – среднеквадратическое отклонение.

Зная t_i, по данным приложения А данной работы находим $F(t_i)$. В том случае, когда параметр t_i принимает отрицательное значение, то значение функции $F(t_i)$ окончательно определяется по формуле

$$F(t_i) = 1 - F(t_i). \quad (1.14)$$

Далее находим значение функции $F(t_i)$ в начале каждого интервала статистического ряда.

$F(t_i) = F(t) = F\left(\frac{t_{iн} - \bar{t}}{\sigma}\right)$ – значение интегральной функции в начале того или иного интервала;

$$t = t_i = \frac{t_{iн} - \bar{t}}{\sigma},$$

где $t_{iн}$ – значение показателя надежности в начале i-го

интервала.

По данной методике определяются значения m_{mi} для нормального закона распределения каждого интервала статистического ряда.

В том случае, если рассматривается закон Вейбулла, то значения функций $F(t)$ находятся несколько иначе.

Для этого находим значение коэффициента a:

$$a = \frac{\bar{t} - t_{см}}{K_b}, \tag{1.15}$$

где K_b – коэффициент распределения Вейбулла, определяемый по данным приложения Б этой работы, исходя из значения коэффициента вариации.

Значение параметра b закона Вейбулла в зависимости от ν находим в приложении Б данной работы.

Для конца первого интервала значение теоретической частоты находим по формуле

$$m_{t1} = N \cdot F\left(\frac{t_{1k} - t_{см}}{a}\right), \tag{1.16}$$

где t_{1k} – значение конца первого интервала.

Значение функции $F(t)$ для закона Вейбулла находим в приложении В данной работы.

Для конца второго интервала

$$m_{t2} = N \cdot F\left(\frac{t_{2k} - t_{см}}{a}\right) - m_{t1}, \tag{1.17}$$

где t_{2k} – значение конца второго интервала.

Аналогично находим значения теоретических частот для остальных интервалов.

Находим значение χ^2.

Чтобы определить вероятность совпадения опытных и теоретических данных по критерию χ^2, необходимо определить число «степеней свободы» r:

$$r = n - k, \tag{1.18}$$

где n – число интервалов; k – число «связей» (для закона Вейбулла, как и для нормального закона, число k = 3).

Зная значение χ^2 и r, по данным приложения Г данной работы находим вероятность совпадения опытных и теоретических данных P. Если P≥0,1 , то выбранный закон является действительным.

Определение доверительных границ рассеивания значений показателя надежности и абсолютных ошибок расчета

Границы, в которых может колебаться значение одиночного показателя надежности при заданной доверительной вероятности α (α = 0,8; 0,9; 0,95; 0,99), называются нижней доверительной границей t_α^H и верхней доверительной границей t_α^B.

Доверительные границы и абсолютная ошибка l_α определяются по формулам

$$t_\alpha^H = \bar{t} - t_\alpha \sigma; \quad (1.19)$$

$$t_\alpha^B = \bar{t} + t_\alpha \sigma; \quad (1.20)$$

$$l_\alpha = \frac{t_\alpha^B - t_\alpha^H}{\bar{t}}, \quad (1.21)$$

где $\bar{t}$ – среднее значение показателя надежности; σ – среднеквадратическое отклонение; t_α – коэффициент Стьюдента, определяемый по данным приложения Д данной работы, исходя из значений α и отношения N/α.

Максимальное значение ошибки l_α не должно превышать 7%.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы и оснащение рабочего места.
3. Результаты выполнения работы.
4.Ответы на контрольные вопросы.

Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Какую информацию несут в себе такие характеристики случайной величины, как $\bar{t}$, σ, ν, гистограмма, полигон, кривая накопленных опытных вероятностей по отношению к показателям надежности?

2. С какой целью проводится статистическая обработка опытных данных по надежности машин?

3. Каково назначение критерия Пирсона χ^2?

Функция распределения *F*(*t*) нормального закона (обязательное)

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,500	504	508	512	516	520	524	528	532	536
0,1	0,540	544	548	552	556	560	564	568	571	575
0,2	0,579	583	587	591	595	599	603	606	610	614
0,3	0,618	622	625	629	633	637	641	644	648	625
0,4	0,655	659	663	666	670	674	677	681	684	688
0,5	0,691	693	699	702	705	709	712	716	719	722
0,6	0,736	729	732	736	739	742	745	749	752	755
0,7	0,758	761	764	767	770	773	776	779	782	785
0,8	0,788	781	794	797	800	802	805	808	811	813
0,9	0,816	819	821	824	826	829	831	834	837	839
1,0	0,841	844	846	849	851	853	855	858	860	862
1,1	0,864	867	869	871	873	875	877	879	881	883
1,2	0,885	887	889	891	893	894	896	898	900	902
1,3	0,903	905	907	908	910	911	913	915	916	918
1,4	0,919	921	922	924	925	926	928	929	932	932
1,5	0,933	934	936	937	938	939	941	942	943	944
1,6	0,945	946	947	948	950	951	952	953	954	955
1,7	0,955	956	957	958	959	960	961	962	962	963
1,8	0,964	965	966	966	967	968	969	969	970	971
1,9	0,971	972	973	973	974	974	975	976	976	977
2,0	0,977	978	978	979	979	980	980	981	981	982
2,1	0,982	983	983	983	984	984	985	985	985	986
2,2	0,986	986	987	987	987	988	988	988	989	989
2,3	0,989	990	990	990	990	991	991	991	991	992
2,4	0,992	992	992	992	993	993	993	993	993	994
2,5	0,994	994	994	994	994	995	995	995	995	995
2,6	0,995	995	995	996	996	996	996	996	996	996
2,8	0,997	998	998	998	998	998	998	998	998	998
3,0	0,999	999	999	999	999	999	999	999	999	999

Параметры и коэффициенты распределения Вейбулла (обязательное)

b	Kb	Cb	v
1,0	1,000	1,000	1,000
1,1	0,965	0,878	0,910
1,2	0,941	0,787	0,837
1,3	0,924	0,716	0,775
1,4	0,911	0,659	0,723
1,5	0,903	0,612	0,678
1,6	0,897	0,574	0,640
1,7	0,892	0,540	0,605
1,8	0,889	0,512	0,575
1,9	0,887	0,485	0,547
2,0	0,886	0,463	0,523
2,1	0,886	0,441	0,498
2,2	0,886	0,425	0,480
2,3	0,886	0,409	0,461
2,4	0,887	0,394	0,444
2,5	0,887	0,380	0,428
3,0	0,893	0,326	0,365

$$\bar{t} = aKb, \qquad \sigma = aCb$$

Функция распределения *F*(*t*) закона Вейбулла (обязательное)

t/α | *b*	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5
0,1	0,095	0,061	0,039	0,025	0,016	0,010	0,003	0,001	0,000
0,2	0,181	0,135	0,100	0,073	0,054	0,039	0,018	0,008	0,004
0,3	0,259	0,210	0,169	0,136	0,108	0,086	0,048	0,027	0,015
0,4	0,330	0,283	0,242	0,206	0,175	0,148	0,096	0,062	0,040
0,5	0,393	0,353	0,315	0,281	0,250	0,221	0,162	0,117	0,085
0,6	0,451	0,418	0,380	0,357	0,329	0,302	0,243	0,194	0,154
0,7	0,503	0,479	0,455	0,432	0,409	0,397	0,336	0,290	0,249
0,8	0,551	0,535	0,519	0,503	0,488	0,473	0,436	0,401	0,367
0,9	0,593	0,586	0,578	0,570	0,563	0,555	0,536	0,518	0,499
1,0	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632
1,1	0,667	0,674	0,681	0,688	0,695	0,702	0,719	0,736	0,752
1,2	0,699	0,712	0,725	0,738	0,750	0,763	0,793	0,822	0,850
1,3	0,727	0,746	0,764	0,782	0,799	0,815	0,854	0,889	0,918
1,4	0,753	0,776	0,798	0,820	0,840	0,859	0,902	0,936	0,961
1,5	0,777	0,803	0,829	0,852	0,874	0,895	0,936	0,966	0,984
1,6	0,798	0,828	0,855	0,880	0,903	0,923	0,961	0,983	0,994
1,7	0,817	0,849	0,878	0,903	0,926	0,944	0,977	0,993	0,998
1,8	0,835	0,868	0,897	0,923	0,944	0,961	0,987	0,997	-
1,9	0,850	0,885	0,914	0,939	0,958	0,973	0,993	0,999	-
2,0	0,865	0,899	0,929	0,952	0,969	0,982	0,996	-	-
2,1	0,877	0,912	0,941	0,962	0,978	0,988	0,998	-	-
2,2	0,889	0,924	0,951	0,971	0,984	0,992	0,999	-	-
2,3	0,900	0,934	0,960	0,977	0,989	0,995	-	-	-
2,4	0,909	0,943	0,967	0,981	0,992	0,997	-	-	-
2,5	0,918	0,950	0,973	0,987	0,994	0,998	-	-	-

Критерий согласия Пирсона χ^2 (обязательное)

r	P,%							
	95	90	80	70	50	30	20	10
1	0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3	0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78
5	1,14	0,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24
6	1,64	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,0
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,34	8,58	9,80	12,0
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,0	13,4
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,7	12,2	14,7
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,8	13,4	16,0

Коэффициенты t_α, γ_1 и γ_3 для доверительных границ (обязательное)

α	0,80			0,90			0,95			0,99		
N/α	t_α	γ_1	γ_3	t_α	γ_1	γ_3	t_α	γ_1	γ_3	t_α	γ_1	γ_3
3	1,89	1,95	0,70	2,92	2,73	0,57	4,30	3,66	0,48	9,92	6,88	0,36
4	1,84	1,74	0,73	2,35	2,29	0,60	3,18	2,93	0,52	5,84	4,85	0,40
5	1,53	1,62	0,75	2,13	2,05	0,62	2,78	2,54	0,55	4,60	3,91	0,43
6	1,48	1,54	0,76	2,02	1,30	0,65	2,57	2,29	0,57	4,03	3,36	0,46
7	1,44	1,48	0,77	1,94	1,80	0,67	2,45	2,13	0,59	3,71	3,00	0,48
8	1,42	1,43	0,78	1,90	1,72	0,63	2,36	2,01	0,61	3,50	2,75	0,50
9	1,40	1,40	0,79	1,86	1,68	0,69	2,31	1,91	0,63	3,36	2,56	0,52
10	1,38	1,37	0,80	1,83	1,61	0,70	2,26	1,83	0,64	3,25	2,42	0,53
11	1,37	1,35	0,80	1,81	1,57	0,70	2,23	1,78	0,64	3,17	2,31	0,54
12	1,36	1,33	0,81	1,80	1,53	0,71	2,20	1,73	0,65	3,11	2,21	0,56
13	1,36	1,31	0,81	1,78	1,50	0,73	2,18	1,69	0,66	3,06	2,13	0,57
14	1,35	1,23	0,83	1,77	1,48	0,74	2,16	1,65	0,67	3,01	2,06	0,58
15	1,34	1,28	0,83	1,76	1,46	0,74	2,15	1,62	0,68	2,98	2,01	0,59
20	1,33	1,24	0,85	1,73	1,37	0,77	2,09	1,51	0,72	2,85	1,81	0,63
25	1,32	1,21	0,86	1,71	1,33	0,79	2,06	1,44	0,74	2,80	1,68	0,66
30	1,31	1,18	0,87	1,70	1,29	0,80	2,04	1,39	0,76	2,75	1,60	0,68
40	1,30	1,16	0,88	1,68	1,24	0,83	0,02	1,32	0,78	2,71	1,50	0,71
50	1,30	1,14	0,89	1,68	1,21	0,84	0,01	1,28	0,80	2,68	1,43	0,74
60	1,30	1,12	0,90	1,67	1,19	0,86	2,00	1,25	0,82	2,66	1,38	0,76
80	1,29	1,10	0,91	1,66	1,16	0,87	1,99	1,21	0,84	2,64	1,32	0,78
100	1,29	1,09	0,92	1,66	1,14	0,88	1,98	1,19	0,86	2,63	1,28	0,80

Практическая работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ И СОПРЯЖЕНИЙ

Цель работы:

Освоить методику определения показателей надежности отдельных деталей и сопряжений.

Оснащение рабочего места:

Станок УРБ-ВП, приспособление для проведения испытаний образцов на износ, микрометры, масло автотракторное, абразивный порошок.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить устройство машины трения (30 мин).
2. Провести испытания образцов на износ на станке УРБ-ВП (40 мин).
3. Провести микрометраж образцов деталей (90 мин).
4. Рассчитать ресурс детали (вала) (40 мин).
5. Рассчитать ресурс сопряжения вал-колодка (50 мин).

Устройство машины трения

Устройство машины трения представлено на рисунке 2.1.

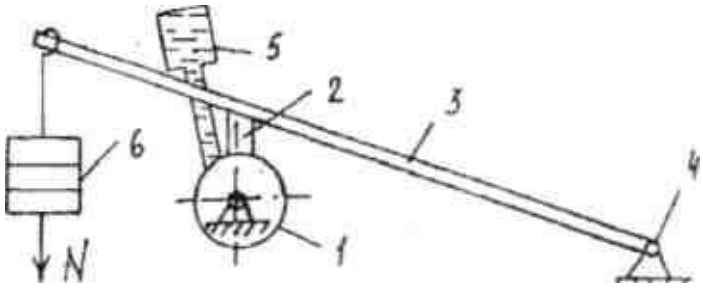


Рисунок 2.1 **–** Устройство машины трения: 1 – валик; 2 – колодка трения; 3 – коромысло; 4 – кронштейн; 5 – маслоподающее устройство; 6 – груз

На конец шпинделя станка УРБ-ВП устанавливается испытываемый валик 1. К валику прижимается колодочка 2, установленная в специальном гнезде грузового коромысла 3.

Грузовое коромысло представляет собой равноплечий рычаг, ось качания которого закреплена в кронштейне 4. На другом конце коромысла подвешен груз 6. Масло с абразивом подается при помощи специального устройства 5.

Испытание образцов (валик и колодка) на износ на станке УРБ-ВП

Установить образцы на машину. Навесить груз. Включить электродвигатель машины, подать смазку в сопряжение и провести испытание на износ в течение 20 мин. Затем остановить электродвигатель снять и протереть валик и колодку. С помощью соответствующего инструмента измерить размеры валика и колодки.

Определение среднего остаточного ресурса детали

Расчет ресурса валика:

На основании микрометража устанавливаем $d_{изм}$ – диаметр валика после износа.

Наработку детали устанавливаем условно – $T_{изм}$ = 1000 мото-ч.

Требуется определить статочный и полный ресурсы валика. Из технических условий известно:

начальный диаметр валика $d_н$ = 60 мм;

предельный диаметр валика $d_{пр}$ = 56 мм;

допустимый диаметр валика $d_{др}$ = 58 мм;

межремонтный ресурс $T_{мр}$ = 1900 мото-ч.

Порядок расчета:

1. Определить среднюю скорость изнашивания валика:

$$\varpi_д = \frac{И_{изм}}{T_{изм} 10^{-3}}, \qquad (2.1)$$

где $\varpi_д$ – скорость изнашивания валика, мото-ч; $И_{изм}$ – износ детали к моменту измерения, мм;

$$И_{изм} = d_н - d_{изм}.$$

2. Определить средний остаточный ресурс валика $T_{д.о}$:

$$T_{д.о} = \frac{И_{пр} - И_{изм}}{\varpi_д}, \quad (2.2)$$

где $И_{пр}$ – предельный износ валика;

$$И_{пр} = d_н - d_{пр}.$$

3. Определить полный ресурс валика $T_{д.п}$:

$$T_{д.п} = \frac{T_{мр} И_{пр}}{И_{пр} - И_{др}}, \quad (2.3)$$

где $И_{др}$ – допустимый износ валика;

$$И_{др} = d_н - d_{др}.$$

Расчет ресурса сопряжения валик – колодка

На основании микрометража устанавливаются размеры валика $D_{изм}$ и колодки $d_{изм}$.

Необходимо определить полный и остаточный ресурсы сопряжения.

Таблица 2.1 – Выписка из технических условий

Детали	Размеры по чертежу, мм	Нормальный зазор, мм	Допустимый зазор, мм	Предельный зазор, мм
Валик	60			
Колодка	22,32-0,02	0,02	1,5	3

Порядок расчета:

1. Определить среднюю скорость изнашивания сопряжения:

$$\varpi_c = \frac{S_{изм} - S_{н.max}}{10^{-3} H_{изм}}, \quad (2.4)$$

где $S_{изм}$ – зазор в сопряжении, измеренный после некоторой наработки, мм [$(S_{изм} = (D_н - D_{изм}) + (d_н - d_{изм})$]; $S_{н.max}$ – наибольший начальный зазор в сопряжении по чертежу, мм.

Значения $D_н$ и $d_н$ представлены в таблице 2.1.

2. Определить средний остаточный ресурс сопряжения $T_{со}$:

$$T_{со} = \frac{S_{пр} - S_{изм}}{\varpi_c}, \quad (2.5)$$

где $S_{пр}$ – предельный зазор в сопряжении ($S_{пр}$ = 3мм).

3. Определить полный ресурс измеренного сопряжения $T_{с.п}$:

$$T_{с.п} = T_{изм} + T_{с.о}, \quad (2.6)$$

4. Определить полный ресурс совокупности по техническим условиям $\overline{T}_{с.п.}$:

$$\overline{T}_{с.п.} = \frac{T_{мр}(S_{пр} - S_{н.\max})}{S_{пр} - S_{др}}, \quad (2.7)$$

где $S_{др}$ – допустимый зазор в сопряжении.

5. Определить средние скорости изнашивания валика и колодки:

$$\varpi_c = \frac{И_{изм}}{10^{-3} T_{изм}}, \quad (2.8)$$

где $И_{изм}$ – измеренный износ валика или колодки.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы и оснащение рабочего места.
3. Результаты выполнения работы.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. От какого показателя зависит ресурс детали?
2. Какие факторы влияют на скорость износа деталей?
3. Назовите основные показатели долговечности деталей машин?

Практическая работа №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ МАШИН

Цель работы:

Освоить методику определения показателей безотказности на основании статистического материала.

Оснащение рабочего места:

Таблицы статистического материала, методические указания.

Порядок выполнения работы:

1. На основании полученного статистического материала в виде таблицы 3.1 составить вариационный ряд информации (30 мин).

Таблица 3.1 – Информация по эксплуатационным отказам трактора МТЗ-80

Номер трактора	Наработка до предельного состояния, мото-ч	Наработка до эксплуатационных отказов, мото-ч	Число отказов m_i
1	1550	100; 157; 570; 740; 1010; 1500	6
2	1800	100; 190; 390; 750; 1180; 1340; 1800	7
3	2150	50; 250; 508; 803; 1207; 1980; 2150	7
4	2250	301; 610; 1700; 1900; 2100; 2250	6
5	2400	570; 940; 1270; 1790; 1870; 2000; 2400	7
6	2900	217; 520; 740; 970; 1180; 1250; 1410; 1680; 1795; 2250; 2740	11
7	2950	150; 450; 690; 830; 1340; 1680; 2560; 2900	8
8	3000	317; 341; 1215; 1675; 2150; 2890; 3000	7
9	3250	70; 280; 400; 740; 910; 1400; 1800; 2370; 3050; 3140; 3200; 3250	12
10	3500	470; 750; 1410; 1710; 2600; 3100; 3150 3300	8

2. Составить статистический ряд и определить параметр потока отказов (таблица 3.2) (30 мин).

Таблица 3.2 – Параметр потока отказов

Интервал наработки, мото-ч	0... …600	600... ...1200	1200… …1800	1800... ...2400	2400... ...3000	3000… ...3600
Число машин N_i	10	10	10	8	5	2
Число отказов m_i	20	16	19	11	6	7
Среднее значение параметра потока отказов ϖ, отказ/мото-ч	0,0033	0,0027	0,0032	0,0023	0,0020	0,0058

3. Определить показатели безотказности приближенным методом (50 мин).

4. Определить показатели безотказности точным методом (60 мин).

Вариационный ряд формируется таким образом, что вся исходная информация располагается в порядке возрастания для удобства дальнейшей работы с ней.

Составление статистического ряда информации

Статистический ряд составляется по методике, представленной в работе №1, и оформляется в виде таблицы 3.2 в соответствии с полученными данными по эксплуатационным отказам машины.

Приближенный метод определения показателей безотказности

1. Средняя наработка на отказ, $\overline{H}_o$:

$$\overline{H}_o = \frac{\sum_1^N H_i / m_i}{N}, \qquad (3.1)$$

где N – количество наблюдаемых машин; H_i – наработка i-й машины за время наблюдения (наработка до предельного состояния); m_i – число отказов i-й машины за время наблюдения.

2. Средняя наработка на отказ (менее точный вариант):

$$\overline{H}_o = \frac{\sum_1^N H_i}{\sum_1^N m_i}. \qquad (3.2)$$

3. Средний параметр потока отказов ϖ:

$$\varpi = \frac{1}{\overline{H}_o}. \qquad (3.3)$$

Для более точного определения среднего значения параметра потока отказов необходимо по данным таблицы 3.2 провести поинтервальное определение ω.

$$\omega = \frac{N_o(н_2) - N_o(н_1)}{(H_2 - H_1)N}, \qquad (3.4)$$

где $N_o(н_2)$, $N_o(н_1)$ – количество ресурсных отказов машин от начала наблюдения и соответственно до наработки H_2 и H_1 (сумма отказов); H_2 и H_1 – наработка машины в конце и начале интервала соответственно; N – количество наблюдаемых машин.

Среднее значение параметра потока отказов ϖ в данном случае определяется по формуле

$$\varpi = \sum_1^n \omega / n, \qquad (3.5)$$

где n – количество интервалов; ω – параметр потока отказов для каждого интервала.

4.Среднее число отказов за какую-то определенную наработку $m_{ср}$ (например за 1000 мото-ч.) определяется по формуле

$$m_{ср} = \varpi 1000. \qquad (3.6)$$

Определение показателей безотказности точным методом

1. Необходимо построить статистический ряд распределения наработок между смежными отказами.

Для этого требуется определить наработки между всеми смежными отказами. Например, для трактора № 1 (таблица 3.1) межотказные наработки будут равны: H_1 = 100 мото-ч; H_2 = 157-100 = 57 мото-ч; H_3 = 570-157 = 413 мото-ч ; H_4 = 740-570 = 170 мото-ч; H_5 = 1010-740 = 170 мото-ч; H_6 = 1500-1010 = 490 мото-ч. И так для каждого трактора. Далее строим статистический ряд для межотказных наработок, с помощью метода сумм определяем значения коэффициентов a_1, a_2, b_1, b_2. Для этого из статистического ряда распределения межотказных наработок выписываются две строки: значения середин интервалов и соответствующие им частоты. К этим строкам приписывают еще две: при этом в третьей строке, примерно на ее середине, делается прочерк одного интервала, а в четвертой строке – три прочерка: средний против прочерка третьей строки и еще два слева и справа от среднего.

В третьей строке производят последовательное сложение частот m_i от начала строки и до прочерка и от конца строки и до прочерка. Суммы чисел подсчитываются и обозначаются коэффициентами a_1 и b_1.

В четвертой строке аналогичным образом складываются и затем суммируются значения третьей строки. Суммы чисел от начала четвертой строки и до первого прочерка и от конца строки и до третьего прочерка обозначаются a_2 и b_2 (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Определение a_1, a_2, b_1, b_2 по методу сумм

Середина интервала, мото-ч	100	300	500	700	900	1100	Сумма
Частота m_i	28	28	16	4	2	1	m_i = 79
Коэффициент a_1 = 84	28	56	-	7	3	1	b_1 = 11
Коэффициент a_2 = 28	28	-	-	-	4	1	b_2 = 5

2. Определим среднюю наработку на отказ $\overline{H}_o$ и среднее квадратическое отклонение σ методом сумм:

$$M_1 = a_1 - b_1\,;\; M_2 = a_1 + b_1 + 2a_2 + 2b_2\,, \tag{3.7}$$

$$\overline{H}_o = t_c - \frac{M_1 A}{\sum m_i}, \tag{3.8}$$

где A – цена интервала в статистическом ряду межотказных наработок; $\sum m_i$ – общее число смежных отказов; $\overline{H}_o$ – средняя наработка на отказ; t_c – значение середины интервала, против которого сделан прочерк в третьей строке (таблица 3.3).

Среднее квадратическое отклонение, σ:

$$\sigma = A\sqrt{\frac{M_2 - \frac{M_1^2}{\sum m_i}}{\sum m_i}}\,. \tag{3.9}$$

3. Определим коэффициент вариации ν, подберем закон распределения и определим его параметры:

$$\nu = \frac{\sigma}{\overline{H}_o}, \tag{3.10}$$

Как правило, рассеивание наработок между эксплуатационными отказами подчиняется закону Вейбулла.

4. Определим доверительные границы рассеивания средней наработки на отказ $\overline{H}_o$:

а) задаемся доверительной вероятностью α = 0,9;

б) по данным приложения Д работы №1 для α =0,9 и N определим γ_1, γ_3;

в) определим доверительные границы:

нижняя $\overline{H}_o^{н} = \sqrt[b]{\gamma_3}\,\overline{H}_o$,

верхняя $\overline{H}_o^{b} = \sqrt[b]{\gamma_1}\,\overline{H}_o$. (3.11)

5. Определим интенсивность эксплуатационных отказов λ (скорость появления отказов) для каждого интервала:

$$\lambda = \frac{N_o(н_2) - N_o(н_1)}{(H_2 - H_1)\,N_u(H_1)}, \tag{3.12}$$

где $N_o(н_1)$ – количество отказов, не зарегистрированных до наработки H_1 (начало каждого интервала) от общего числа отказов m_i; $N_o(н_2)$ – количество отказов, зарегистрированных

до наработки H_2 (конец каждого интервала) от общего числа отказов m_i.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы и оснащение рабочего места.
3. Результаты выполнения работы.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. В каком случае используется метод сумм при определении показателей надежности?
2. От чего зависит значение наработки на отказ какой-либо машины?
3. Назовите основные показатели безотказности машин?

Практическая работа №4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Цель работы:

Освоить основные методы определения минимального количества объектов наблюдений и определить необходимое количество объектов наблюдений для получения достоверной информации о надежности машин.

Время выполнения работы – 4 ч.

Порядок выполнения работы:

1. Кратко познакомиться с основными методами расчета минимального числа объектов наблюдений (10 мин).
2. На основе исходной информации о надежности машин (приложение А данной работы) произвести первичную статистическую обработку (60 мин).
3. Определить необходимое количество объектов наблюдений с помощью параметрических методов (40 мин).

4. Определить необходимое количество объектов наблюдений с помощью непараметрических методов (30 мин).

1. Основные методы расчета минимального числа объектов наблюдений

Основным источником информации о надежности машин, их деталей и узлов является проведение специальных наблюдений в условиях эксплуатации. При этом фиксируется наработка, время возникновения отказов и время восстановления работоспособности. Кроме того, важно знать необходимое минимальное количество объектов наблюдений для получения достоверной информации о надежности машин.

Методы расчета минимального числа объектов наблюдений могут быть в соответствии с ГОСТ 17510-72: параметрическими (при известном виде закона распределения исследуемой случайной величины) и непараметрическими (когда вид закона распределения неизвестен).

2. Обработка первичной информации

Обработка первичной информации о надежности машин производится в следующем порядке.

В соответствии с полученным заданием, где первичная статистическая информация представлена в виде вариационного ряда, составить статистический ряд опытной информации и занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Статистический ряд опытной информации

Интервал, тыс. мото-ч	1,0...2,0	2,0...3,0	3,0...4,0	4,0...5,0	5,0...6,0	6,0...7,0
Частота, m_i	5	10	15	10	5	0
Опытная вероятность P_i	0,05	0,09	0,45	0,35	0,05	
$\sum_{1}^{n} Pi$	0,05	0,14	0,59	0,94	0,99	

Число интервалов статистического ряда n определяется по формуле

$$n = \frac{t_k - t_{см}}{A}, \quad (4.1)$$

где t_k – конечная точка информации; $t_{см}$ – величина смещения или расстояние от нуля до первой точки информации; A – цена интервала.

Таблица 4.1 состоит из четырех строк:

в первой строке указывают границы интервалов;

во второй строке – количество случаев (частоту m_i) в каждом интервале;

в третьей строке – опытную вероятность появления показателя надежности в каждом интервале, Pi;

в четвертой строке – накопленную опытную вероятность, $\sum_1^n Pi$.

Опытная вероятность (Pi) определяется по формуле

$$Pi = \frac{m_i}{N}, \quad (4.2)$$

где m_i – число случаев появления показателей надежности в каждом интервале; N – повторность информации.

При наличии статистического ряда среднее значение показателя надежности $\bar{t}$ определяется по формуле

$$\bar{t} = \sum_1^n t_{ic} P_i, \quad (4.3)$$

где n – количество интервалов в статистическом ряду; t_{ic} – значение середины i-го интервала; P_i – опытная вероятность i-го интервала.

Среднеквадратическое отклонение σ определяется по уравнению

$$\sigma = \sqrt{\sum_1^n \left(t_{ic} - \bar{t} \right)^2 P_i}. \quad (4.4)$$

Далее определяем коэффициент вариации v по формуле

$$\nu = \frac{\sigma}{\bar{t}}, \qquad (4.5)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение; $\bar{t}$ – среднее значение показателя надежности.

По величине коэффициента вариации определяют теоретический закон распределения случайной величины.

В случае если $\nu \leq 0{,}33$ – выбирается закон нормального распределения; когда $\nu > 0{,}33$ – выбирается закон Вейбулла.

3. Параметрические методы

Закон распределения Вейбулла

Если функция плотности вероятности при параметре распределения Вейбулла b задана в виде

$$f(t) = b\lambda t^{b-1} \ell^{-\lambda\tau^{u}} \quad \text{при } \tau \geq 0, \qquad (4.6)$$

то число объектов наблюдений N определяют в зависимости от относительной ошибки δ, среднего значения $\bar{t}$ исследуемой случайной величины с доверительной вероятностью α и ожидаемой величины коэффициента вариации v, который ранее определен по выражению (4.5).

Относительная ошибка δ определяется по формуле

$$\delta = \frac{tb - \vec{t}}{\vec{t}}, \qquad (4.7)$$

где $\vec{t}$ – среднее значение случайной величины, опреленное по формуле (1.3); tb – верхняя доверительная граница.

Для закона Вейбулла

$$tb = \text{◖} - cb \sqrt[b]{\gamma_1} + cb. \qquad (4.8)$$

Для нормального закона

$$tb = \vec{t} + t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \qquad (4.9)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение [см. формулу (4.4)];

t_α, b, Cb, γ_1 – коэффициенты, которые определяют по приложению Д работы №1, исходя из значений доверительной вероятности α (α = 0,8; 0,9; 0,95; 0,99) и отношения N/α.

Для определения числа объектов N используют таблицу Б.1 приложения данной работы, если рассматривается закон Вейбулла.

Нормальный закон распределения

Если функция плотности вероятности задана в виде

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}}, \qquad (4.10)$$

то число объектов наблюдений N определяют в зависимости от относительной ошибки δ среднего значения $\vec{t}$ с доверительной вероятностью α и ожидаемой величины коэффициента вариации ν.

Относительную ошибку определяют по формуле (4.7).

Выбирают доверительную вероятность α.

Величина ν известна из выражения (4.5).

Находят отношение δ/ν.

В таблице Б.2 приложения Б данной работы по отношению δ/ν и выбранной доверительной вероятности находят минимальное число объектов наблюдений N.

4. Непараметрические методы

При неизвестном виде закона распределения случайной величины минимальное число объектов наблюдений N для проверки требуемой вероятности $P(t)$ безотказной работы в течение некоторого времени t (доремонтный ресурс) с доверительной вероятностью α задается из условия отсутствия отказов за время t.

Выбирают доверительную вероятность α.

Задаются требуемой минимальной величиной вероятности безотказной работы $P(t)$. $P(t)$=0,5; 0,8; 0,9; 0,95; 0,98; 0,99; 0,995.

По данным приложения В данной работы для заданных значений $P(t)$ и α находят соответствующее минимальное число объектов наблюдений N.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель и задачи работы.
3. Результаты выполнения работы.
4.Ответы на контрольные вопросы.
Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Какие методы определения минимального числа объектов наблюдений известны вам?
2. Чем отличают параметрические методы от непараметрических?
3. По каким параметрам выбирается тот или другой метод определения минимального числа объектов наблюдений?

Информация по доремонтному ресурсу двигателей Д-240 (вариант 1) и СМД-66 (вариант 2) (обязательное)

Номер двигателя	Доремонтный ресурс, мото-ч		Номер двигателя	Доремонтный ресурс, мото-ч	
	Вариант 1	Вариант 2		Вариант 1	Вариант 2
1	2100	2150	23	3550	3550
2	2200	2250	24	3500	3550
3	2300	2300	25	3620	3680
4	2350	2600	26	3650	3690
5	2720	2600	27	3650	3700
6	2900	2610	28	3700	3700
7	3020	2650	29	3750	3710
8	3060	2700	30	3750	3750
9	3060	2720	31	3800	3800
10	3180	2750	32	3800	3850
11	3200	2750	33	3810	3850
12	3210	2800	34	3820	3900
13	3210	2810	35	3850	3910
14	3260	2850	36	3900	4000
15	3300	2850	37	3910	4200
16	3300	2950	38	4150	4250
17	3300	3060	39	4200	4500
18	3420	3060	40	4350	4600
19	3460	3230	41	4500	4900
20	3480	3310	42	5000	5100
21	3500	3450	43	5100	5250
22	3520	3500	44	5200	5540
			45	5600	6100

Число объектов наблюдений (обязательное)

Таблица Б.1 – Число объектов наблюдений N для закона Вейбулла

Относительная ошибка	Коэффициент вариации v														
	0,4	0,45	0,50	0,55	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,0	1,1	1,2	1,5
α = 0,80															
0,05	50	60	70	90	108	140	160	180	225	275	285	300	350	500	700
0,10	4	18	23	27	31	46	51	56	81	67	74	80	100	120	150
0,15	7	9	11	13	16	22	25	28	30	32	40	45	52	75	80
0,20	5	6	8	9	10	14	15	18	20	22	22	27	30	40	54
α = 0,90															
0,05	100	152	180	220	265	360	420	460	510	550	570	600	900	970	>1000
0,10	30	37	46	57	70	92	100	125	150	167	185	200	250	300	400
0,15	15	19	24	28	34	45	51	59	67	73	81	90	115	142	200
0,20	10	12	15	19	20	29	32	37	40	45	50	55	65	75	117
α = 0,95															
0,05	172	218	270	340	430	560	640	720	820	900	940	1000	>1000	>1000	>1000
0,10	47	59	74	93	115	115	178	208	227	242	270	300	400	500	600
0,15	24	30	37	45	53	72	82	98	112	120	139	150	185	220	300
0,20	15	19	23	29	33	45	50	57	65	72	79	90	135	140	200
α = 0,99															
0,05	350	438	525	640	867	560	1000	1000	1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
0,10	94	122	148	180	232	155	360	400	448	483	540	600	800	1000	>1000
0,15	46	58	75	88	109	72	174	105	224	250	276	300	350	430	600
0,20	23	36	45	53	66	45	100	118	131	144	163	184	210	220	400

Таблица Б.2 – Значения $\frac{\delta}{\nu}$ в зависимости от N и α

N	α			
	0,80	0,90	0,95	0,99
2	0,973	2,176	4,465	22,501
3	0,613	1,089	1,686	4,021
4	0,489	0,819	1,177	2,271
5	0,421	0,686	0,953	1,676
6	0,376	0,603	0,823	1,374
7	0,342	0,544	0,734	1,188
8	0,317	0,500	0,670	1,060
9	0,296	0,466	0,620	0,965
10	0,279	0,437	0,580	0,892
11	0,265	0,414	0,546	0,833
12	0,253	0,393	0,518	0,785
13	0,242	0,376	0,494	0,744
14	0,233	0,361	0,473	0,708
15	0,224	0,347	0,455	0,678
16	0,217	0,335	0,438	0,651
17	0,210	0,324	0,423	0,626
18	0,203	0,315	0,410	0,605
19	0,198	0,305	0,398	0,585
20	0,193	0,297	0,387	0,568
21	0,188	0,289	0,376	0,552
22	0,183	0,282	0,367	0,537
23	0,179	0,275	0,358	0,523
24	0,175	0,269	0,350	0,510
25	0,171	0,264	0,342	0,498
26	0,168	0,258	0,335	0,487
27	0,165	0,253	0,328	0,477
28	0,162	0,248	0,322	0,467
29	0,159	0,244	0,316	0,458
30	0,156	0,239	0,310	0,449
31	0,153	0,235	0,305	0,441
41	0,133	0,203	0,263	0,378
61	0,109	0,166	0,214	0,306
121	0,077	0,117	0,151	0,214
1001	0,027	0,041	0,052	0,074

Число N объектов наблюдений (γ=0) (обязательное)

$P(t)$	α			
	0,80	0,90	0,95	0,99
0,500	-	-	-	7
0,800	8	10	13	20
0,900	15	21	30	44
0,950	30	40	60	85
0,980	75	120	140	230
0,990	150	220	280	430
0,995	330	430	600	800

Практическая работа №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Цель работы:

Изучить методику расчета показателей ремонтопригодности машин и определить их значения в соответствии с полученным заданием (приложение А данной работы), а также методику расчета комплексных показателей надежности машин и произвести расчет их значений в соответствии с полученным заданием (приложения А четвертой и пятой работ).

Время выполнения работы – 4 ч.

Порядок выполнения работы:

1. На основе исходной информации (приложение А данной работы) произвести первичную статистическую обработку по методике, представленной в работе №1 (60 мин).
2. На основе представленной методики расчета показателей ремонтопригодности машин определить их значения (40 мин).
3. На основе представленной методики расчета комплексных показателей надежности определить их значения (40 мин).

Первичная статистическая обработка данных

В соответствии с полученным заданием произвести статистическую обработку первичной информации по методике, представленной в работе №1. Определить средние значения $\vec{t}$, среднеквадратическое отклонение σ и коэффициент вариации ν на основе составленного статистического ряда. Прежде чем составить статистический ряд, необходимо значения времени ремонта объекта расположить в порядке возрастания, т.е. построить вариационный ряд.

Основные показатели ремонтопригодности

- время восстановления t – время, затрачиваемое на обнаружение и устранение неисправности, ч;

- среднее время восстановления $\vec{t}$ – матожидание времени восстановления работоспособности, ч;

- вероятность восстановления в заданное время $P(t)$ – вероятность того, что время восстановления работоспособности объекта не превысит заданного.

Среднее время восстановления $\vec{t}$ было определено по методике, представленной в работе № 1.

Вероятность восстановления в заданное время $P(t)$ определяется для каждого интервала статистического ряда. Далее необходимо определить теоретический закон распределения случайной величины – времени восстановления работоспособности. Для этого опираются на коэффициент вариации [выражение (4.5) работы №4].

При нормальном законе распределения $P(t)$ находим следующим образом.

Используя известную формулу (здесь $F(t)$ – функция распределения нормального закона)

$$F(t)=1- P(t), \qquad (5.1)$$

находим значения функции $F(t)$ в зависимости от t.

Значение t определяем по формуле

$$t = \frac{t_i - \vec{t}}{\sigma}, \qquad (5.2)$$

где t_i – середина i-го интервала статистического ряда; $\vec{t}$ – среднее значение времени восстановления; σ – среднеквадратическое отклонение.

Зная t, по данным приложения А работы №1 находим значение $F(t)$. Далее по формуле (5.1) находим значение $P(t)$ для i-го интервала. Найденное значение $P(t)$ означает вероятность того, что в данном интервале время восстановления работоспособности объекта не превысит заданного (для МТЗ-167 ч, для ДТ-175С – 236 ч).

Когда случайная величина – время восстановления работоспособности распределена по закону Вейбулла, $P(t)$ определяем по следующей методике.

Для нахождения значений функции $F(t)$ необходимо найти значение $\frac{t}{a}$ для каждого интервала и параметры закона Вейбулла – b и Cb.

$$\frac{t}{a} = \frac{t_i - t_{см}}{a}, \tag{5.3}$$

где t_i – середина *i*-го интервала; $t_{см}$ – начальное значение вариационного ряда.

$$a = \frac{\sigma}{Cb}, \tag{5.4}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение.

Параметры закона распределения Вейбулла b и Cb находим по данным приложения Б работы №1.

Рассчитав значение $\frac{t}{a}$ и зная b, по приложению В работы №1 находим значение $F(t)$ для каждого интервала, далее определяем значение $P(t)$.

Комплексные показатели надежности

Важнейшими комплексными показателями надежности машин являются коэффициент технического использования и коэффициент готовности.

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ определяется по формуле

$$K_{ти} = \frac{t_{сум}}{t_{сум} + t_{рем} + t_{обсл}}, \tag{5.5}$$

где $t_{сум}$ – суммарная наработка всех объектов (приложение А работы №4); $t_{рем}$ – суммарное время простоев из-за ремонтов всех объектов (приложение А данной работы); $t_{обсл}$ – суммарное время простоев на проведение ТО всех объектов. В данном случае рассматриваем самое трудоемкое ТО-3.

Периодичность ТО-3 составляет 1000 мото-ч, трудоемкость ТО-3 для ДТ-175С – 25 ч, для МТЗ – 17 ч.

Используя данные приложения А работы №4, находим количество ТО-3 и их общую трудоемкость для того или другого трактора и определяем $t_{обсл}$.

Коэффициент готовности $K_Г$ определяем по формуле

$$K_Г = \frac{To}{To + \bar{t}}, \quad (5.6)$$

где To – наработка на отказ:

$$To = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\frac{t_i}{r_i}, \quad (5.7)$$

где n – количество объектов; r_i – количество отказов; t_i – наработка i-го объекта, мото-ч.

Данные о n, r_i, t_i находим в приложении А работы №4.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Результаты выполнения работы.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные показатели ремонтопригодности и раскройте их суть.
2. Какие основные комплексные показатели надежности известны вам? Методика их определения.
3. Чем отличается коэффициент технического использования от коэффициента готовности?

Затраты времени на проведение текущего ремонта тракторов ДТ-175С (вариант 1) и МТЗ-82 (вариант 2) (обязательное)

Номер трактора	Затраты времени на ремонт объекта, ч		Номер трактора	Затраты времени на ремонт объекта, ч	
	Вариант 1	Вариант 2		Вариант 1	Вариант 2
1	239	169	23	234	168
2	241	170	24	235	165
3	235	166	25	237	164
4	237	163	26	239	167
5	241	175	27	236	178
6	245	171	28	233	180
7	232	167	29	246	160
8	231	162	30	235	166
9	243	163	31	236	167
10	242	164	32	237	165
11	236	159	33	230	164
12	234	161	34	231	179
13	230	176	35	232	163
14	240	162	36	240	162
15	233	179	37	241	168
16	238	177	38	242	178
17	236	167	39	233	175
18	234	166	40	234	161
19	248	172	41	244	165
20	249	170	42	243	169
21	250	165	43	248	170
22	247	161	44	235	167
			45	234	171

Практическая работа №6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Цель работы:

Изучить методы определения точности расчетных показателей надежности, далее определить точность рассчитанных ранее показателей ремонтопригодности и комплексных показателей надежности тракторов ДТ-175С и МТЗ.

Время выполнения работы – 2 ч.

Порядок выполнения работы:

1. На основе представленной информации изучить методы определения точности показателей надежности (20 мин).
2. Определить точность полученных в разделе 2 показателей ремонтопригодности (50 мин).

Методы определения точности показателей надежности

Чтобы получить представление о точности оценок параметров, пользуются разработанными в математической статистике понятиями доверительной вероятности и доверительного интервала.

Возможная наибольшая абсолютная ошибка $\ell\alpha$ зависит от величины доверительной вероятности α. Чем с большим доверием необходимо оценить показатель, тем больше будут абсолютная ошибка и величина доверительного интервала.

В практике расчета показателей надежности сельскохозяйственной техники чаще всего приходится встречаться с расчетом средних значений показателей. Точность определения показателей при этом будет зависеть от количества испытанных объектов – объема выборки n. Так, если провести несколько испытаний машин (в каждом испытании объем выборки n_i, то для каждого случая средние значения показателей надежности будут отличаться друг от друга по величине, рассеиваясь вокруг истинного, но неизвестного нам матожидания для генеральной совокупности. Это рассеивание зависит от количества машин, участвующих в

каждом испытании, чем их меньше, тем рассеивание будет больше.

Связь величины рассеивания среднего значения показателя (среднеквадратического отклонения среднего значения – $\sigma\vec{t}$) с величиной рассеивания самого показателя (среднеквадратического отклонения самого показателя σ) при разном количестве объектов испытаний установлена в теории вероятностей в виде

$$\sigma\vec{t} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \tag{6.1}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение времени восстановления t от среднего значения $\vec{t}$; n – число объектов испытаний.

С учетом этого отношения абсолютная ошибка $\ell\alpha$, нижняя – t_{α}^{H} и верхняя t_{α}^{b} границы доверительного интервала и величина интервала $J\alpha$ при заданной доверительности α определяются по формулам:

Для нормального закона

$$\ell_{\alpha} = t_{\alpha}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \tag{6.2}$$

$$t_{\alpha}^{H} = \vec{t} - t_{\alpha}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \tag{6.3}$$

$$t_{\alpha}^{b} = \vec{t} + t_{\alpha}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \tag{6.4}$$

$$J\alpha = t_{\alpha}^{b} - t_{\alpha}^{H}, \tag{6.5}$$

где $\vec{t}$ – среднее значение времени восстановления тракторов ДТ-175С и МТЗ; t_{α} – коэффициент, определяемый по данным приложения Д работы №1 в зависимости от значений α и отношения n/α.

Для закона Вейбулла

$$t_{\alpha}^{H} = \left(-Cb\right)\sqrt[b]{\gamma_3} + Cb, \tag{6.6}$$

$$t_{\alpha}^{b} = \left(-Cb\sqrt[b]{\gamma_1} + Cb\right), \quad (6.7)$$

$$J\alpha = t_{\alpha}^{b} - t_{\alpha}^{H}, \quad (6.8)$$

где γ_1, γ_3 – коэффициенты, определяемые по данным приложения Д работы №1 в зависимости от значений доверительной вероятности α и числа объектов испытаний N; Cb, b – коэффициенты распределения Вейбулла (приложение Б работы №1).

В отличие от закона нормального распределения, доверительные границы при распределении Вейбулла асимметричны среднему значению показателя надежности, причем верхняя граница отличается от среднего на большую величину, чем нижняя.

Наибольшая абсолютная ошибка $\ell\alpha$ определяется по формуле

$$\ell_{\alpha} = t_{\alpha}\frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (6.9)$$

Относительную ошибку E_{α} среднего значения показателя независимо от вида распределения можно определить по формуле

$$E_{\alpha} = \frac{t_{\alpha}^{b}}{\bar{t} - t_{см}}, \quad (6.10)$$

где $t_{см}$ – величина смещения (начальное значение вариационного ряда времени восстановления тракторов ДТ-175С и МТЗ).

Определение точности расчетных значений показателей надежности

Точность полученных показателей надежности (показатели ремонтопригодности) определяют в следующем порядке:

1. Задаются доверительной вероятностью α (α=0,8; 0,9; 0,95).

2. Зная закон распределения и объем выборки n, определяют значение величины t_α и γ_1, γ_3 (приложение Д работы №1).

3. Определяют границы доверительного интервала и абсолютную ошибку для нормального закона распределения или закона распределения Вейбулла, используя формулы (6.2)...(6.9).

4. Определяют относительную ошибку по формуле (6.10).

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Результаты выполнения работы.
4.Ответы на контрольные вопросы.
Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. С помощью каких величин определяется точность показателей надежности?
2. Чем отличается методика определения точности показателей надежности для нормального закона распределения и закона распределения Вейбулла?
3. Какое назначение имеет доверительная вероятность α?

Практическая работа №7

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕМОНТА

Цель работы:
Освоить методику оценки качества ремонта тракторов и их агрегатов.
Время выполнения работы – 2 ч.

Порядок выполнения работы:
1. Изучить методику определения показателей качества ремонта тракторов.
1. Оценить качество ремонта тракторов ДТ-175С и МТЗ.

Методика оценки качества ремонта машин

Оценку качества ремонта машин на ремонтных предприятиях производят по коэффициентам качества для 80% гамма-ресурса $K(80\%)_{MP}$ и среднего ресурса $\overline{K}_{MP}$:

$$K(80\%)_{MP} = \frac{T_{MP}(80\%)}{T^{H}_{MP}(80\%)\,K_3}, \qquad (7.1)$$

$$\bar{K}_{MP} = \frac{\bar{T}_{MP}}{1{,}45 T^{H}_{MP}(80\%)\, K_З}, \qquad (7.2)$$

где $\bar{T}_{MP}$ – фактический средний межремонтный ресурс (определен в предыдущих работах с использованием данных приложения А работы №4), мото-ч; $K_З$ – зональный коэффициент (для Восточно-Сибирского региона $K_З$ = 0,8); $T_{MP}(80\%)$ – восьмидесяти процентный гамма-ресурс отремонтированных машин, рассчитываемый по формуле (7.3) в том случае, когда принят нормальный закон распределения (при $\nu \le 0{,}33$).

$$T_{MP}(80\%) = \bar{T}_{MP} - H_к \sigma, \qquad (7.3)$$

где $\bar{T}_{MP}$ – фактический средний межремонтный ресурс [определен ранее по формуле (4.3)]; σ – среднеквадратическое отклонение [определено по формуле (4.4)]; H_K – квантиль, определяемый по приложению А данной работы в зависимости от P [для $T_{MP}(80\%)$ P=0,8].

Если принят закон Вейбулла (ν>0,33), то по данным приложения Б работы №1 определяем для найденного по формуле (4.5) значения коэффициента вариации ν его параметры: b, Cb; $\alpha = \frac{\sigma}{Cb}$ [σ – среднеквадратическое отклонение, определенное по формуле (4.4)].

Принимаем P=0,8.

Далее определяем значение квантиля $Нк/\alpha$ по данным приложения Б данной работы для $F(t)$=1-$P(T_{MP})$ и b. Найдя значение $Нк/\alpha=x$, окончательно находим $Нк = x \cdot \alpha$.

Определим 80-процентный ресурс:

$$T_{MP}(80\%)=Нк+t_{CM}, \qquad (7.4)$$

где t_{CM} – величина смещения (для 1 варианта t_{CM}=1600, для 2 варианта t_{CM} =1550, согласно приложению А работы №4). $T^{H}_{MP}(80\%)$ – нормированный 80% гамма-ресурс, значения которого для тракторов ДТ-175С и МТЗ-82 находятся в таблице

7.1.

Таблица 7.1 – Значения нормативного 80% гамма-ресурса

Марка трактора	ДТ-175С	МТЗ-82
Двигатели $T^{H}_{MP}(80\%)$, мото-ч	4800	4500

Определение коэффициента качества ремонта

Определяем коэффициент качества ремонта и его доверительные границы по межремонтному 80% гамма-ресурсу [формула (7.1)].

Доверительные границы рассеивания коэффициентов качества ремонта определяются с учетом величины относительной ошибки переноса δ, определяемой по формуле (4.7) работы №4.

$$K(80\%)^{H}_{MP} = (-\delta) \cdot K(80\%)_{MP};$$
$$K(80\%)^{B}_{MP} = (+\delta) \cdot K(80\%)_{MP}, \quad (7.5)$$

где $K(80\%)_{MP}$ – коэффициент качества для 80% гамма-ресурса, определяемый по формуле (7.1); $K(80\%)^{H}_{MP}$ – нижняя доверительная граница; $K(80\%)^{B}_{MP}$ – верхняя доверительная граница.

Коэффициент качества ремонта $\overline{K}_{MP}$ определяется по формуле (7.2). Его доверительные границы рассеивания определяем по формулам

$$\overline{K}^{H}_{MP} = (-\delta) \cdot \overline{K}_{MP},$$
$$\overline{K}^{B}_{MP} = (+\delta) \cdot \overline{K}_{MP}, \quad (7.6)$$

где $\overline{K}^{H}_{MP}$ – нижняя доверительная граница; $\overline{K}^{B}_{MP}$ – верхняя доверительная граница.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Результаты выполнения работы.
4.Ответы на контрольные вопросы.
Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. С помощью каких показателей оценивается качество ремонта машин?
2. В чем отличие коэффициентов $K(80\%)_{MP}$ и $\overline{K}_{MP}$?
3. Каково назначение верхней и нижней доверительных границ среднего значения коэффициента качества ремонта?

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Квантили H_K нормального распределения (обязательное)

P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	0,000	0,025	0,050	0,075	0,100	0,126	0,151	0,176	0,202	0,227
0,6	0,253	0,279	0,305	0,332	0,358	0,385	0,412	0,440	0,468	0,496
0,7	0,524	0,553	0,583	0,613	0,643	0,675	0,706	0,739	0,772	0,806
0,8	0,842	0,878	0,915	0,954	0,994	1,036	1,080	1,126	1,175	1,227
0,9	1,282	1,341	1,405	1,476	1,555	1,645	1,751	1,881	2,054	2,326

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Квантили H/α распределения закона Вейбулла (обязательное)

F(*t*)	*b*	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
0,01		0,010	0,022	0,037	0,056	0,078	0,100	0,159	0,216
0,02		0,020	0,039	0,062	0,087	0,114	0,143	0,210	0,272
0,05		0,051	0,084	0,120	0,156	0,192	0,226	0,305	0,372
0,07		0,073	0,112	0,154	0,194	0,233	0,269	0,350	0,417
0,10		0,105	0,153	0,200	0,245	0,286	0,325	0,407	0,472
0,15		0,174	0232	0,285	0,332	0,380	0,419	0,498	0,558
0,20		0,223	0,287	0,343	0,392	0,435	0,472	0,549	0,607
0,30		0,357	0,424	0,479	0,525	0,564	0,597	0,662	0,709
0,40		0,511	0,571	0,619	0,657	0,688	0,715	0,764	0,799
0,50		0,693	0,737	0,770	0,795	0,816	0,833	0,864	0,885
0,60		0,916	0,930	0,939	0,947	0,953	0,957	0,966	0,971

Практическая работа №8

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ

Цель работы:

Изучение износа деталей при помощи микрометража с целью определения показателей надежности.

Время выполнения работы 6 ч.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя вариант задания с данными об износе гильз (29 значений) и данными таблицы 8.1.

2. Выполнить все необходимые расчеты, представленные в подпунктах данной работы, построить графики по результатам расчетов с целью изучения закономерностей износа гильз цилиндров двигателя А-41.

Микрометраж деталей

Задачи микрометража

Микрометраж гильзы проводится для выявления и анализа характера и величины износа гильзы в различных сечениях по высоте.

Микрометраж партии гильз, поступивших в ремонт двигателей, проводится с целью получения первичной информации для дальнейшей статистической обработки.

Методика измерений

Измерения проведем индикаторным нутромером в нескольких сечениях при помощи винтового приспособления. Величина износа в каждом сечении определяется по формуле

$$h_i = D_o - D_i, \qquad (8.1)$$

где h_i – величина износа гильзы в i-м сечении, мм; D_o – диаметр гильзы в ее верхней неизношенной части, мм; D_i – диаметр гильзы в $\underline{i}$-м сечении, мм.

Настроив индикаторный нутромер на нуль по верхней неизношенной части гильзы, по отклонениям стрелки определяем величину износа в сечениях. Результаты замеров сводим в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Результаты замеров гильзы

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h_i	0	0,17	0,18	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02

По результатам замеров построим диаграмму износа гильзы по высоте с учетом того, что первое сечение расположено в верхней части гильзы (рисунок 8.1).

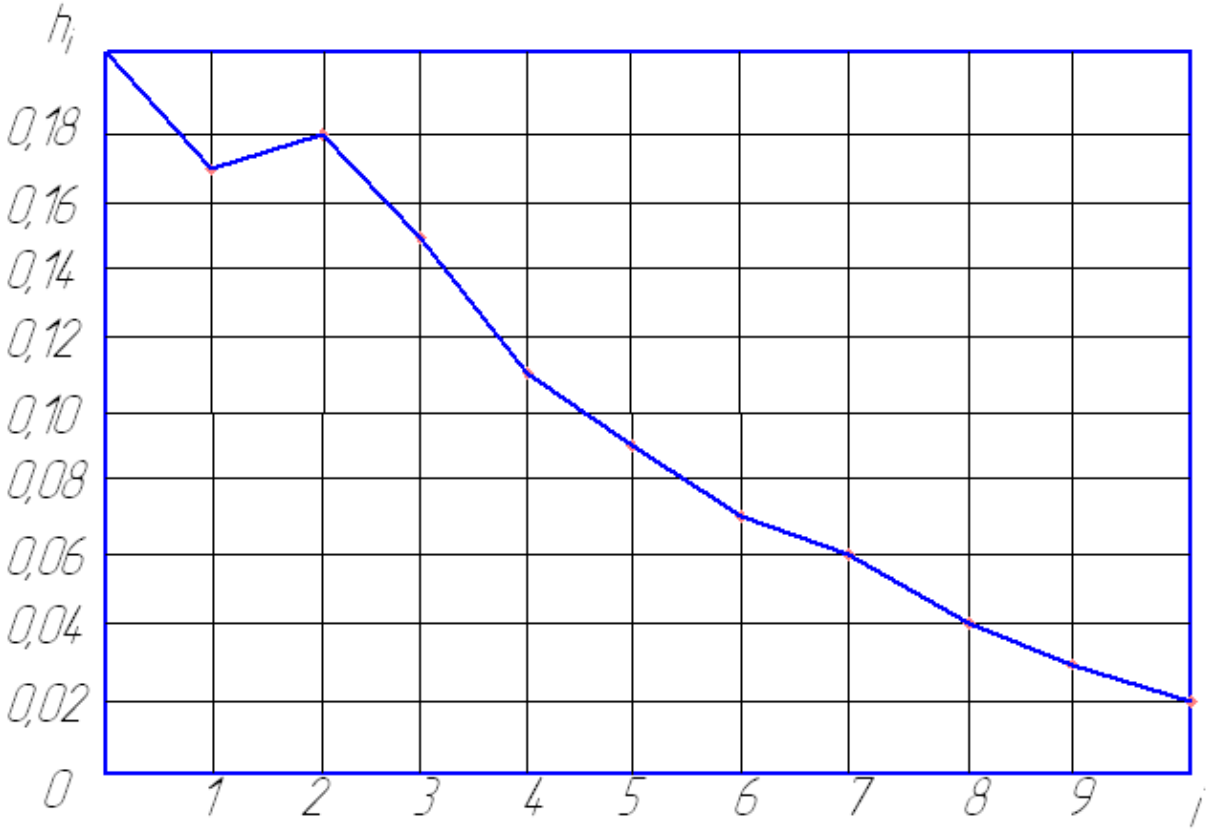


Рисунок 8.1 – Диаграмма износа гильзы

Обработка результатов микрометража деталей

Предварительные вычисления

В результате измерения партии гильз цилиндров двигателя А-41 в сечении наибольшего износа получены следующие значения износа в мм, которые расположены в порядке возрастания: 0,03; 0,05; 0,06; 0,07; 0,07; 0,08; 0,09; 0,09; 0,10; 0,11; 0,11; 0,11; 0,12; 0,12; 0,13; 0,13; 0,15; 0,15; 0,16; 0,16; 0,20; 0,20; 0,21; 0,23; 0,25; 0,25; 0,27; 0,28; 0,30. Всего 29 замеров.

Определение зоны рассеивания S:

$$S = h_{\max} - h_{\min}, \tag{8.2}$$

где $h_{\max}$ – максимальная величина износа гильзы; $h_{\min}$ – минимальная величина износа гильзы, $h_{\min} = 0{,}03$ мм.

$$S = 0{,}30 - 0{,}03 = 0{,}27 \text{ мм}.$$

Определяем число разрядов (интервалов) K

$$K = \sqrt{29} = 5{,}39.$$

Принимаем K=5.

Определяем длину разряда l.

$$l = \frac{S}{K} = \frac{0{,}27}{5} = 0{,}05\,. \tag{8.3}$$

Определяем величину сдвига c из условия

$$0{,}03 \geq c \geq 0{,}03 - \frac{0{,}05}{2}.$$

В нашем случае имеет смысл принять c = 0,02 мм.

Начало первого разряда a_1 принимаем равным величине сдвига, т.е.

$$a_1 = c = 0{,}02 \text{ мм}.$$

В нашем случае имеет смысл принять конечное значение ряда информации $b_к = 0{,}32$ мм. Тогда окончательно длина разряда определится из выражения

$$l = \frac{b_k - c}{K} = \frac{0{,}32 - 0{,}02}{5} = 0{,}06 \text{ мм}. \tag{8.4}$$

Построение таблицы статистического ряда и статистических графиков

Таблица 8.2 – Статистический ряд износа гильзы

i	Разряд		h_i	l_i	m_i	$q_i = \frac{m_i}{n}$	$f = \frac{q_i}{l_i}$	$\sum F_i$
	a_i	b_i						
1	0,02	0,08	0,05	0,06	6	0,207	3,45	0,207
2	0,08	0,14	0,11	0,06	10	0,345	5,75	0,552
3	0,14	0,20	0,17	0,06	6	0,207	3,45	0,759

4	0,20	0,26	0,23	0,06	4	0,138	2,3	0,897
5	0,26	0,32	0,29	0,06	3	0,103	1,72	1

В таблице a_i – начало i-го разряда, b_i – конец i-го разряда.

$l_i = b_i - a_i$ – длина i-го разряда, мм;

$t_i = \frac{a_i - b_i}{2}$ – середина i-го разряда, мм;

n – сумма частот в разрядах;

m_i – частота или число отказавших объектов в i-м разряде, т. е. в промежутке наработки от a_i до b_i, мм;

$q_i = \frac{m_i}{n}$ – частость или статистическая вероятность отказа в i-м разряде;

$f = \frac{q_i}{l_i}$ – статистическая плотность распределения износа в i-м разряде, мм$^{-1}$;

$\sum F_i$ – накопленная частота или статистическая функция распределения износа в i-м разряде.

По данным таблицы 8.2 строим гистограмму (рисунок 8.2), используя значения q_i в каждом разряде i.

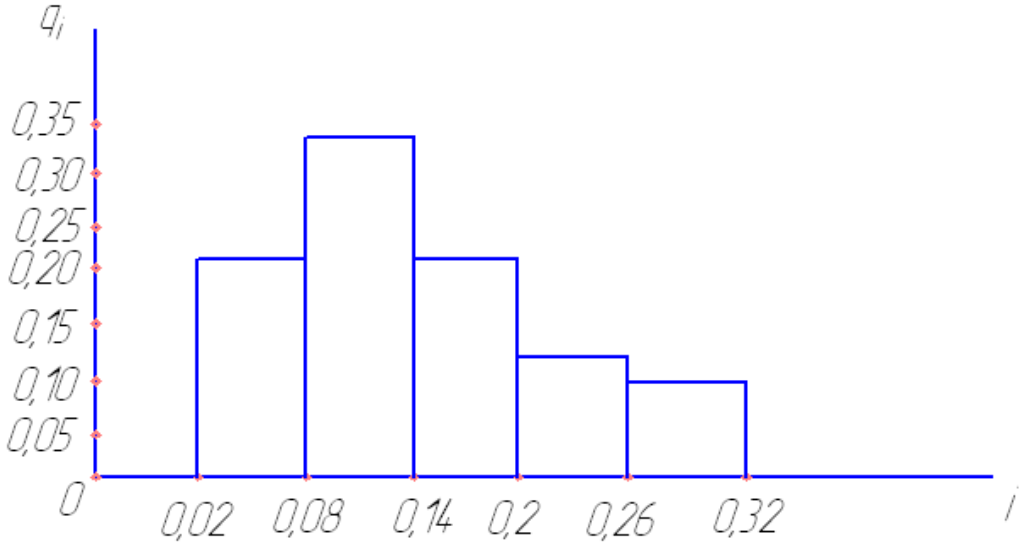


Рисунок 8.2 – Гистограмма распределения износа гильз

Определение математического ожидания, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации

Статистическую оценку математического ожидания $\bar{m}$ и

среднеквадратического отклонения σ, а также коэффициента вариации ν определяем по формулам:

$$\bar{m} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{K} h_i \cdot m_i; \tag{8.5}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{1}^{K}\left(h_i - \bar{m}\right)^2 m_i}. \tag{8.6}$$

Расчеты сведем в таблицу.

Таблица 8.3 – К расчету $\bar{m}$ и σ

i	h_i	m_i	$h_i \cdot m_i$	$\left(h_i - \bar{m}\right)^2 m_i$
1	0,05	6	0,3	0,06
2	0,11	10	1,1	0,016
3	0,17	6	1,02	0,0024
4	0,23	4	0,92	0,0256
5	0,29	3	0,87	0,0588
			$\sum_{1}^{K} h_i \cdot m_i = 4{,}21$	$\sum\left(h_i - \bar{m}\right)^2 m_i = 0{,}1628$

$$\bar{m} = \frac{4{,}21}{29} = 0{,}15 \text{ мм}.$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{29-1} \cdot 0{,}1628} = 0{,}076 \text{ мм}.$$

Определяем коэффициент вариации по формуле

$$\nu = \frac{\sigma}{\bar{m} - c}. \tag{8.7}$$

$$\nu = \frac{0{,}076}{0{,}15 - 0{,}02} = 0{,}585.$$

Подбор теоретического закона распределения и определение его параметров

Решение о том, какому закону распределения подчиняется величина износа детали, принимаем с учетом трех факторов: физической сущности случайной величины с учетом области применения того или иного закона распределения; внешнего вида гистограммы, сравнивая ее с различными кривыми теоретического закона распределения $f(t)$; величины коэффициента вариации ν.

По третьему фактору имеются следующие рекомендации:

при ν < 0,3 скорее всего имеет место ЗНР;

при 0,3 < ν < 0,5 может иметь место как ЗНР, так и ЗРВ;

при ν> 0,5 имеет место ЗРВ;

при ν = 1 имеет место ЭЗР как частный случай ЗРВ.

По физической сущности в данном случае нас устраивает два закона: закон нормального распределения и закон распределения Вейбулла, поскольку речь идет об износе детали. По внешнему виду гистограммы (рисунок 8.2), скорее всего, подходит закон распределения Вейбулла, так как гистограмма ассиметрична. По величине коэффициента вариации также подходит закон Вейбулла, поскольку ν=0,585.

Таким образом, мы можем предположить, что величина износа детали подчиняется закону распределения Вейбулла:

$$f(h) = \frac{b}{a}\left(\frac{h-c}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{h-c}{a}\right)^{b}}, \qquad (8.8)$$

$$F(h) = 1 - e^{-\left(\frac{h-c}{a}\right)^{b}}, \qquad (8.9)$$

где $F(h)$ – функция распределения вероятностей; $f(h)$ – теоретический закон распределения износа гильз; h – величина износа детали, мм; a, b, c – параметры закона распределения.

Параметр сдвига c = 0,02 определен ранее.

По значению коэффициента вариации из таблицы приложения Б работы №1 находим значение параметра b и коэффициента c_b. При ν=0,59 b=1,76, c_b = 0,52. Находим значение параметра a по формуле

$$a = \frac{\sigma}{c_b}. \qquad (8.10)$$

$$a = \frac{0{,}076}{0{,}52} = 0{,}146 \text{ мм.}$$

Итак, принимаем a = 0,15; b = 1,76; c = 0,02. Тогда предполагаемый теоретический закон $f(h)$ и функция $F(h)$ примут вид:

$$f(h) = \frac{1{,}76}{0{,}15}\left(\frac{h-0{,}02}{0{,}15}\right)^{1{,}76-1} \cdot e^{-\left(\frac{h-0{,}02}{0{,}15}\right)^{1{,}76}}, \qquad (8.11)$$

$$F(h) = 1 - e^{-\left(\frac{h-0{,}02}{0{,}15}\right)^{1{,}76}}, \qquad (8.12)$$

Построение теоретических графиков функции распределения износа

Для построения теоретических графиков произведем расчеты по формулам (8.8) и (8.9). Расчеты сведем в таблицу 8.4.

Таблица 8.4 – К расчету $F(h)$ и $f(h)$

h	0,02	0,05	0,08	0,11	0,14	0,17	0,20	0,23	0,26	0,29	0,32
$F(h)$	0	0,058	0,181	0,334	0,491	0,632	0,748	0,83	0,89	0,92	0,95
$f(h)$	0	4,70	5,24	4,99	4,33	3,60	2,47	2,09	1,43	1,10	0,72

Далее строим графики зависимости $F(h)$ и $f(h)$ от h.

Проверка соответствия принятого теоретического закона статистическим данным

По формуле (8.13) определяем меру расхождения χ^2. Расчеты сводим в таблицу 8.5.

$$\chi^2 = \sum_{1}^{K} \frac{\left[n_i - [\sum m_i \cdot q_i]\right]^2}{\sum m_i \cdot q_i} \qquad (8.13)$$

Значение q_i вычисляем по формуле (8.14), а значения

$F(b_i)$ для конечного значения каждого разряда i и $F(a_i)$ для начального значения каждого разряда i берем из таблицы 8.4.

$$q_i = F(b_i) - F(a_i), \qquad (8.14)$$

где a_i – начало i-го разряда (см. таблицу 8.2); b_i – конец i-го разряда (см. таблицу 8.2).

Таблица 8.5 – К расчету χ^2

i	m_i	q_i	$\sum m_i \cdot q_i$	$\frac{(m_i - [\sum m_i \cdot q_i])^2}{\sum m_i \cdot q_i}$
1	6	0,181	5,249	0,107
2	10	0,310	8,99	0,113
3	6	0,257	7,453	0,283
4	4	0,142	4,118	0,003
5	3	0,060	1,74	0,912

$$\sum_{1}^{K} \frac{(m_i - [\sum m_i \cdot q_i])^2}{\sum m_i \cdot q_i} = 1{,}445.$$

Итак, $\chi^2 = 1{,}445$.

По формуле (8.15) определяем число степеней свободы r учетом того, что для закона распределения Вейбулла φ=2.

$$r = k - (\varphi + 1), \qquad (8.15)$$

где k – число разрядов статистического ряда; φ – число параметров принятого закона распределения.

$$r = 5 - (2 + 1) = 2.$$

Зная χ^2 и r, по таблице приложения А данной работы находим вероятность совпадения теоретического закона распределения с опытным распределением износа гильзы P = 45%. Так как P>10%, можем сделать вывод о том, что принятый теоретический закон распределения Вейбулла не противоречит статистическим данным. Следовательно, износ гильз цилиндров двигателя А-41 подчиняется закону распределения Вейбулла с параметрами: a = 0,15, b = 1,76, c = 0,02.

Анализ кривых и определение процента гильз, подлежащих обработке под ремонтный размер

Знание закона распределения износа деталей позволяет решать целый ряд задач:

- определять процент деталей, годных к дальнейшему употреблению;
- обоснованно подходить к выбору способа восстановления детали;
- определять процент деталей подлежащих восстановлению;
- прогнозировать потребность в запасных частях.

Определим процент гильз, подлежащих обработке под ремонтный размер методом расточки с последующим хонингованием. Для этого нужно найти максимально допустимый диаметр гильзы $D_{\max}$, при котором еще возможна обработка ее под ремонтный размер:

$$D_{\max} = D_p - (б_p + б_x), \tag{8.16}$$

где D_P – ремонтный размер гильзы, мм; $б_P$ – припуск на расточку, мм; $б_x$ – припуск на хонингование, мм.

Максимально допустимый износ гильзы $h_{\max}$ при этом составит:

$$h_{\max} = D_{\max} - D_n, \tag{8.17}$$

где D_n – номинальный диаметр гильзы, мм.

Вероятность того, что величина износа не превысит значения $h_{\max}$, и есть не что иное, как доля гильз, подлежащих обработке под ремонтный размер:

$$P(h < h_{\max}) = F(h_{\max}) = 1 - e^{-\left(\frac{h_{\max} - c}{a}\right)^b}. \tag{8.18}$$

В нашем случае D_n = 130 мм; D_P = 130,5 мм; $б_P$ = 0,1 мм; $б_x$ = 0,05мм.

$D_{\max}$ = 130,5 - (0,1 + 0,05) = 130,35 мм; $h_{\max}$ = 130,35 - 130 = 0,35 мм (в дальнейших расчетах принимаем $h_{\max}$ равным

0,30 мм).

В расчетах a=0,15, b=1,76, c=0,02.

$$F(h_{\max}) = 1 - e^{-\left(\frac{0,30-0,02}{0,15}\right)^{1,76}} = 0,95.$$

Таким образом, 95% гильз можно обработать под ремонтный размер, так как их износ не превышает 0,30 мм, а 5% гильз с износом более 0,30 мм можно восстановить только наращиванием или методом усадки.

Особенности обработки данных в случае закона нормального распределения

Если выдвинуть гипотезу о подчинении износа закону нормального распределения, то расчеты в нашем примере нужно вести по формулам

$$f(h) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h-\bar{m})^2}{2\cdot\sigma^2}},$$

$$F(h) = \Phi\left(\frac{h-\bar{m}}{\sigma}\right) = \Phi(t), \qquad (8.19)$$

где $\bar{m}$=0,15; σ=0,076 мм – параметры ЗНР; h – величина износа гильзы.

$$t = \frac{h-\bar{m}}{\sigma}.$$

Значения функции $\Phi(t)$ в зависимости от t находим в приложении А работы №1.

Результаты расчетов сводим в таблицу 8.6.

Таблица 8.6 – К расчету $f(h)$ и $F(h)$ для ЗНР

$h = a_i,\ b_i$	0,02	0,08	0,14	0,20	0,26	0,32
$\frac{h-\bar{m}}{\sigma}$	-1,71	-0,92	-0,13	0,66	1,45	2,24

$\frac{\left(h-\bar{m}\right)^2}{2\sigma^2}$	1,462	0,423	0,008	0,218	1,051	2,509
$f(h)$	1,217	3,439	5,207	4,221	1,835	0,428
$F(h)$	0,044	0,179	0,448	0,745	0,926	0,987

Далее строим графики зависимости $F(h)$ и $f(h)$ от h.

Теперь проверим, соответствует ли теоретический закон статистическим данным. Для этого определим меру расхождения χ^2.

Таблица 8.7 – К расчету χ^2

i	m_i	q_i	$\sum m_i \cdot q_i$	$\frac{(m_i - [\sum m_i \cdot q_i])^2}{\sum m_i \cdot q_i}$
1	6	0,135	3,915	1,110
2	10	0,269	7,801	0,620
3	6	0,297	8,613	0,723
4	4	0,181	5,249	0,297
5	3	0,061	1,769	0,857

$$\sum_{1}^{K} \frac{(m_i - [\sum m_i \cdot q_i])^2}{\sum m_i \cdot q_i} = 3{,}607 .$$

$\chi^2 = 3{,}607$, $r = 3$, по таблице приложения А данной работы находим вероятность P=26%. Так как P>10%, делаем вывод о том, что данный закон нормального распределения не противоречит опытным данным об износе гильз цилиндров.

Так как оба закона (ЗРВ и ЗНР) не противоречат опытным данным, принимаем закон нормального распределения для дальнейшей обработки опытных данных.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель и задачи работы.
3. Результаты выполнения работы.
4.Ответы на контрольные вопросы.

Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Для чего проводится микрометраж деталей машин в испытаний на надежность?
2. Назовите основные факторы для выбора теоретического закона распределения случайной величины.
3. Что представляет из себя гистограмма распределения случайной величины?
4. В чем отличие графика функции $f(h)$ для двух рассмотренных в лабораторной работе теоретических законов распределения?
5. Какова минимальная величина вероятности совпадения опытных и теоретических данных согласно критерию Пирсона χ^2?

Критерий согласия Пирсона χ^2 (обязательное)

r	P,%							
	95	90	80	70	50	30	20	10
1	0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3	0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78
5	1,14	0,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24
6	1,64	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,0
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,34	8,58	9,80	12,0
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,0	13,4
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,7	12,2	14,7
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,8	13,4	16,0

Практическая работа №9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Цель работы:

Освоить математическое моделирование процесса эксплуатации.

Время выполнения работы – 4 ч.

Порядок выполнения работы

1. Получить вариант задания у преподавателя:
- значение наработки устройства;
- среднее значение наработки до отказа;
- значения коэффициента вариации.

2. Рассчитать функцию распределения наработки $f(t)$ и показатели надежности устройства $P(t)$ и $\lambda_i(t)$ для двух законов распределения по методике, представленной в данной работе, и построить графики по результатам расчета.

Техническое описание исследуемого устройства

Основой исследуемого элемента является клапан давления. Клапаны давления делятся на напорные (предохранительные или прямые), редукционные и клапаны разности давлений. Существуют также комбинированные аппараты, выполняющие функции переливного или редукционного клапанов (в зависимости от направления потока), редукционного клапана и реле давления. Предохранительные клапаны предохраняют гидропривод от давления, превышающего установленное значение. Они действуют лишь в аварийных ситуациях (пропускают масло из напорной линии в сливную) в отличие от переливных клапанов, предназначенных для поддержания заданного давления путем непрерывного слива масла во время работы. В станкостроении централизованно не изготавливаются клапаны для работы в аварийном режиме; предохранительные клапаны гидросистем, как правило, работают в режиме переливных клапанов.

При небольших расходах масла и рабочих давлениях применяют предохранительные клапаны прямого действия (рисунок 9.1), в которых давление масла, создаваемое насосом

2, воздействует на шарик 5 (или плунжер) предохранительного клапана 3, прижатый к седлу пружиной 4. Когда усилие от давления масла на шарик отходит влево, масло через щель между шариком и седлом сливается в резервуар 1, причем вследствие дросселирования потока давление в трубопроводе 6 поддерживается постоянным и примерно равным отношению усилия пружины 4 к площади шарика 5, на которую действует давление масла. При увеличении расхода масла и рабочего давления резко увеличиваются размеры пружины, поэтому в гидросистемах чаще используют аппараты непрямого действия, в которых небольшой вспомогательный клапан управляет перемещением переливного золотника, подключенного к напорной и сливной линиям.

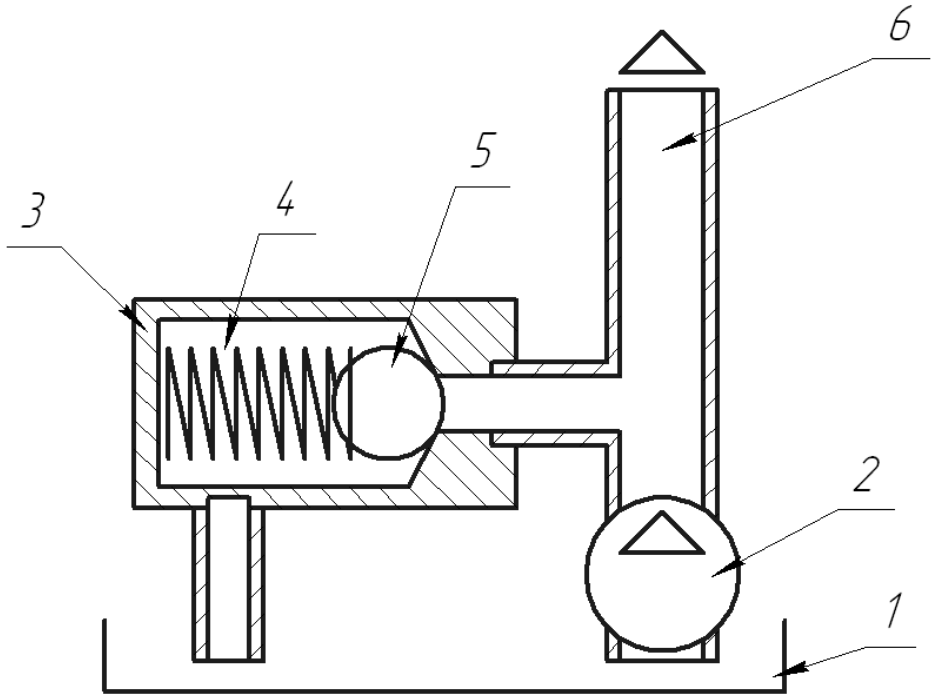


Рисунок 9.1 – Схема предохранительного клапана

Предохранительные клапаны должны поддерживать постоянно установленное давление в возможно более широком диапазоне изменения расходов масла, проходящих через клапан. В динамических режимах необходимо быстродействие, исключающее возникновение пика давления при резком увеличении расхода масла (например, в момент включения насоса или торможении гидродвигателя). Однако повышение быстродействия часто вызывает потерю устойчивости, что сопровождается шумом и колебаниями давления.

Редукционные клапаны служат для создания установленного постоянного давления в отдельных участках

гидросистемы, сниженного по сравнению с давлением в напорной линии.

При рабочих давлениях до 10 МПа (иногда до 20 МПа) для предохранения гидросистем от перегрузки, поддержания заданных давлений при разности давлений в подводимом и отводном потоках масла, для дистанционного управления потоком и различных блокировок применяют гидроклапаны давления (напорные золотники), в которых на торец золотника действует давление масла в одной линии управления, а на противоположный – давление в другой линии управления и результирующее усилие пружины.

Аппараты имеют две основные линии и две линии управления, причем, используя эти линии управления независимо или, соединяя их, можно получить четыре исполнения клапана, имеющих различное функциональное назначение (клапаны могут работать в режиме предохранительного и переливного клапанов, а также режимов регулируемых клапанов разности давлений и клапанов последовательности).

К группе комбинированных аппаратов относятся регуляторы давления для уравновешивающих цилиндров и клапаны усилия режима. Первые предназначены для поддержания установленного давления в линии отвода независимо от направления потока и являются аппаратами непрямого действия. Вторые аналогичны по функциональному назначению, однако, являются аппаратами прямого действия и могут дополнительно оснащаться микровыключателем, контролирующим осевое положение золотника в корпусе.

Исполнение:

Клапаны давления имеют различные исполнения по типу управления, диаметру условного прохода, присоединенного к номинальному давлению.

Большинство клапанов имеют ручное управление и лишь некоторые исполнения предохранительных клапанов имеют электрическое управление нагрузкой или пропорциональное электроуправление.

Схема подключения клапанов показана на рисунке 9.2. В гидросистеме масло от регулируемого насоса 1 через распределитель 4 поступает в поршневую полость цилиндра 5, а из истоковой вытесняется в бак.

Давление масла определяется нагрузкой на цилиндре и контролируется манометром 2. Предохранительный клапан 3

срабатывает в случае перегрузки. Предохранительный клапан работает в переливном режиме, так как дроссель 6 ограничивает поток масла, поступающего от нерегулируемого насоса 1 в цилиндр 5, а оставшаяся часть масла через клапан 3 возвращается в бак, причем давление в гидросистеме определяется настройкой клапана и практически не зависит от нагрузки на цилиндре. В гидросистеме (рисунок 9.2) насос разгружается от давления при выключении магнита клапана 3 с электроуправлением. Поскольку в сливной линии установлен подпорный клапан 7, слив управления введен в бак из отверстия *Y*. Это позволяет обеспечить постоянство давления в линии *P* независимо от настройки давления подпора. В схеме предусмотрена возможность ручной нагрузки насоса с помощью вентиля 8, подключенного к отверстию *X*.

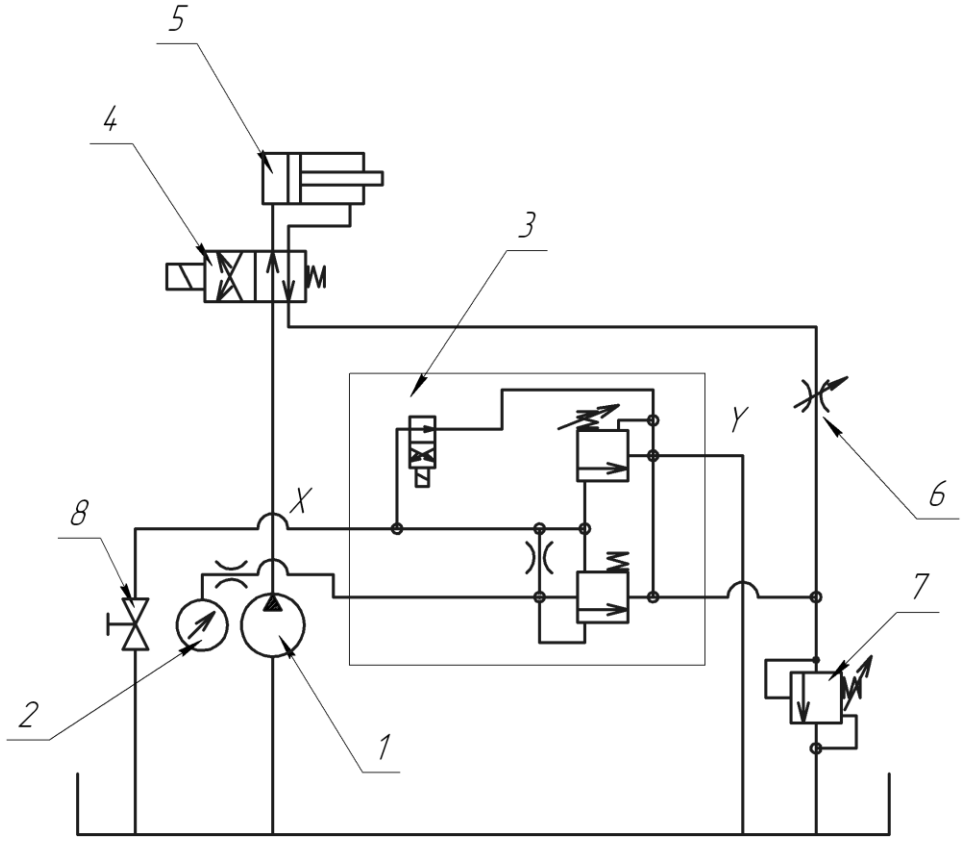


Рисунок 9.2 – Схема подключения клапанов

Краткие теоретические сведения об основах моделирования процесса эксплуатации

Экспериментальное определение показателей надежности является невыгодным из-за больших затрат времени и ресурсов. Поэтому часто используется математическое моделирование процесса эксплуатации.

Для моделирования процесса эксплуатации мы должны задаться законом распределения времени наработки до отказа. В данной работе рассматриваются два случая: закон Гаусса и экспоненциальный закон распределения. Необходимо также задаться определенным значением среднего времени наработки до отказа.

Смоделируем работу устройства, предполагая, что отказы устройства подчиняются:

а) экспоненциальному закону

$$f(t) = \frac{1}{\bar{t}} e^{-\frac{t_i}{\bar{t}}}; \tag{9.1}$$

б) закону Гаусса

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_i - \bar{t})^2}{2\sigma^2}}, \tag{9.2}$$

где $\overline{t}$ – текущее значение наработки устройства; $\bar{t}$ – среднее значение наработки до отказа; σ – среднее квадратическое отклонение наработки до отказа.

Показатели надежности будем определять по следующим выражениям:

Вероятность безотказной работы $p_i(t)$:

$$p_i(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt. \tag{9.3}$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda_i(t) = \frac{f_i(t)}{p_i(t)}. \tag{9.4}$$

для экспоненциального закона

$$p_i(t) = e^{t_i / \bar{t}};$$
$$\lambda_i(t) = \frac{1}{\bar{t}}, \quad (9.5)$$

где $\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов;

для нормального закона

$$p_i(t) = 1 - F(t), \quad (9.6)$$

где $F(t)$ – функция распределения нормального закона в зависимости от параметра *t.*

$$t = \frac{t_i - \bar{t}}{\sigma}, \quad (9.7)$$

$$\sigma = \nu \cdot \bar{t}, \quad (9.8)$$

где ν – коэффициент вариации наработки до отказа.

Значения функции $F(t)$ в зависимости от параметра t представлены в приложении А работы №1.

Интенсивность отказов $\lambda_i(t)$ находим по формуле (9.4) в зависимости от текущего значения t_i .

Определение показателей надежности исследуемого элемента гидравлического оборудования

В соответствии с заданием принимаем среднее время наработки до отказа $\bar{t}$ = 1600 ч.

При моделировании функционирования принятого элемента гидравлического оборудования число этих элементов принято равным N=10000. Число интервалов гистограммы n принимаем равным 6.

Далее порядок расчетов следующий:

рассчитываем функции распределения наработки до

отказа по формулам (9.1) и (9.2) данной работы и строим гистограммы и графики, представленные на рисунках 9.3, 9.4, 9.9, 9.14 данной работы;

рассчитываем вероятность безотказной работы и интенсивность отказов устройства для экспоненциального и нормального законов распределения наработки до отказа, используя формулы (9.4)-(9.8) данной работы. Строим гистограммы и графики, представленные на рисунках (9.5)-(9.8), (9.10)-(9.13) и (9.15)-(9.18) данной работы.

Экспоненциальный закон

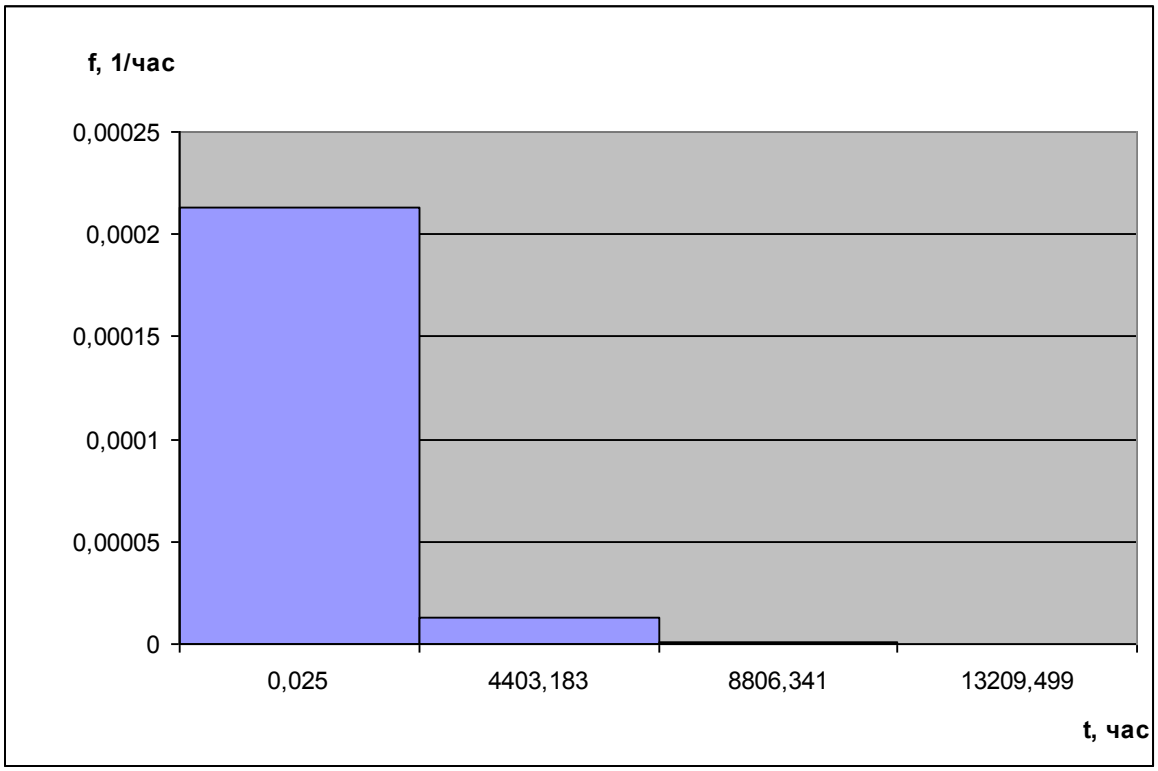


Рисунок 9.3 – Гистограмма функции распределения $f(t)$ от наработки t

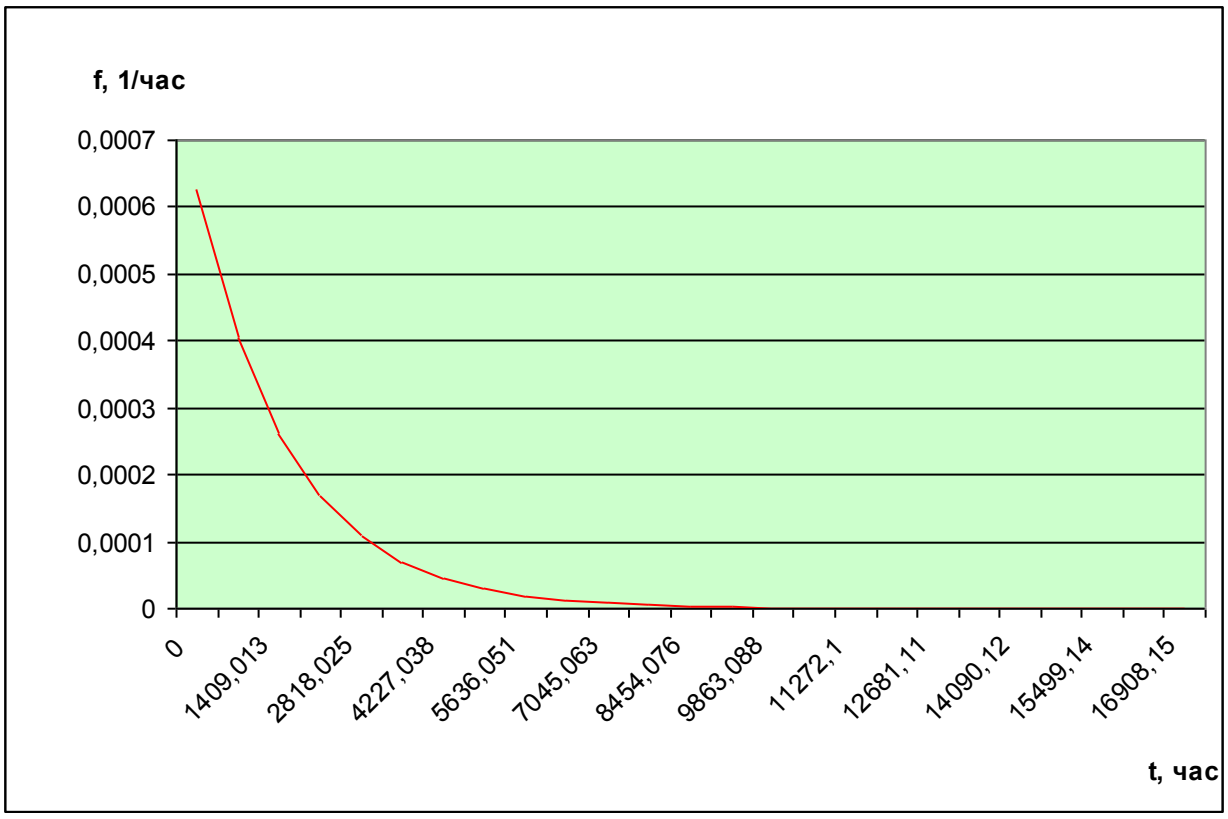


Рисунок 9.4 – Графическая зависимость $f(t)$ от наработки t

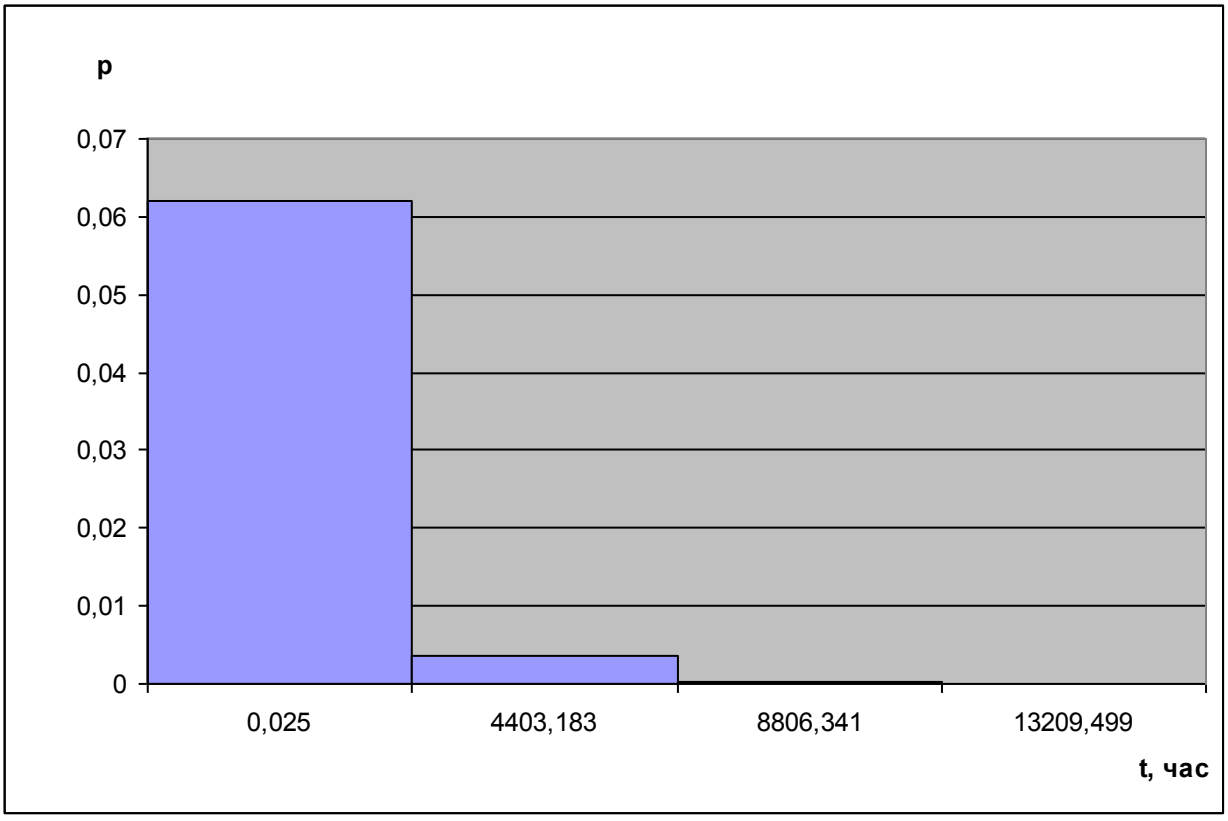


Рисунок 9.5 – Гистограмма вероятности безотказной работы $p(t)$ от наработки t

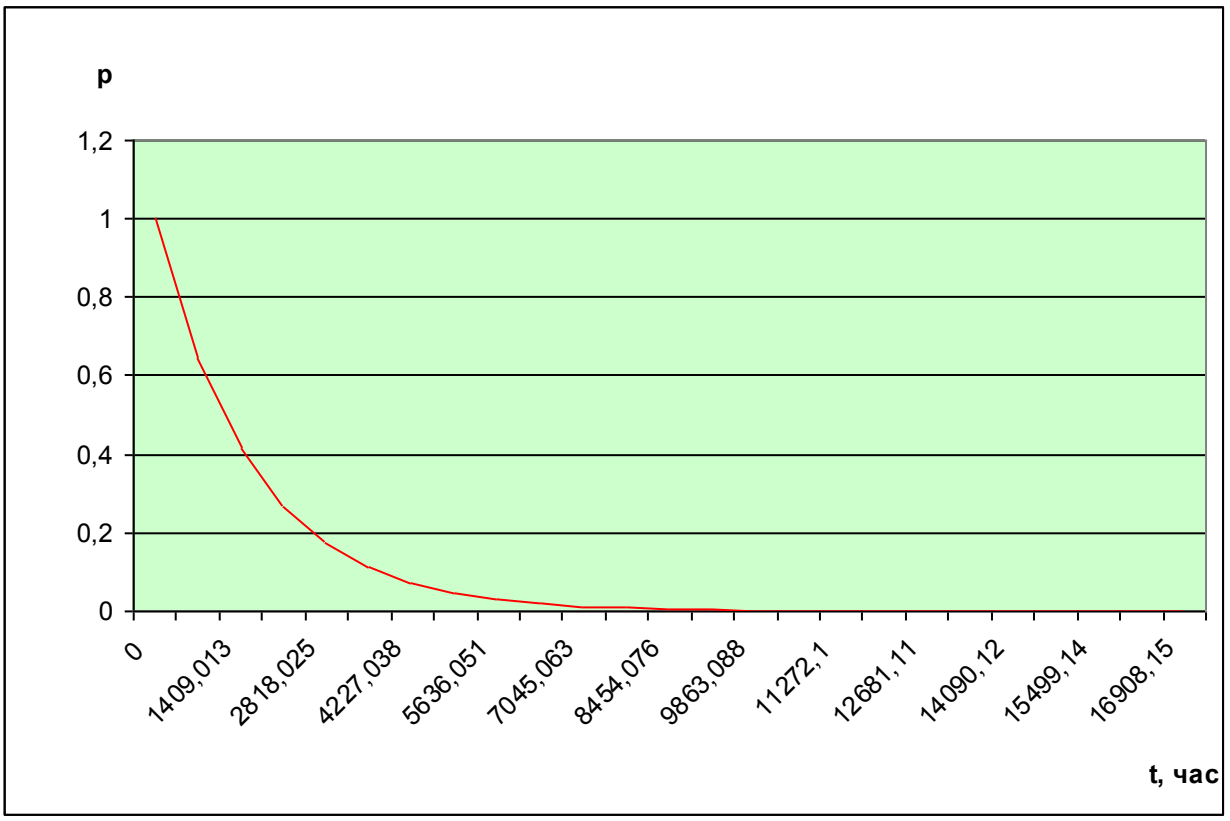


Рисунок 9.6 – Графическая зависимость $p(t)$ от наработки *t*

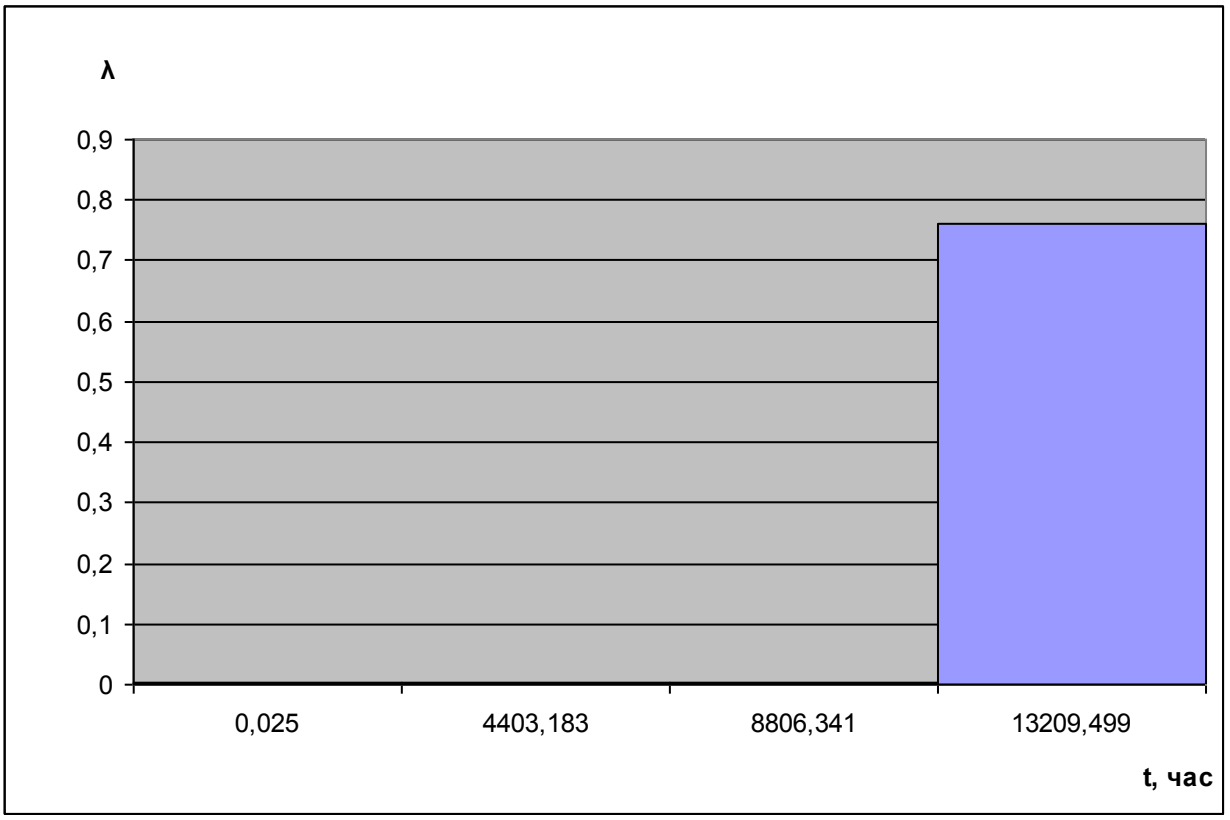


Рисунок 9.7 – Гистограмма интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ от наработки *t*

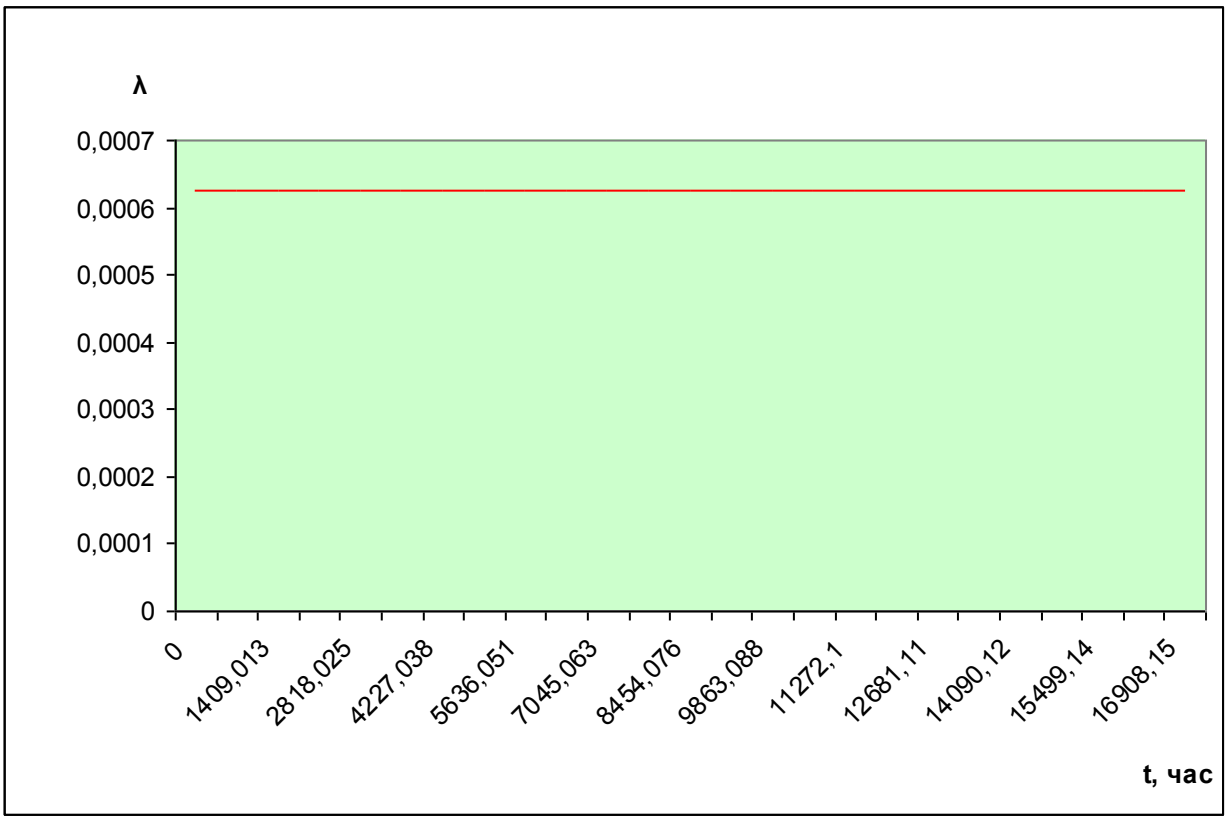


Рисунок 9.8 – Графическая зависимость $\lambda_i(t)$ от наработки t

Как видно из приведенных рисунков рассматриваемое изделие – клапан разгрузки золотникового типа работает ненадежно: в момент $\bar{t}$ =1600 часов отказало около 40% изделий.

Закон Гаусса

При моделировании отказов оборудования, распределенных по законам Гаусса, задаем значения коэффициента вариации ν =0,1 (значительный разброс) и ν =0,05 (незначительный разброс).

Результаты моделирования приведены на рисунках 9.9...9.18.

Строим графические зависимости показателей надежности при ν = 0,1.

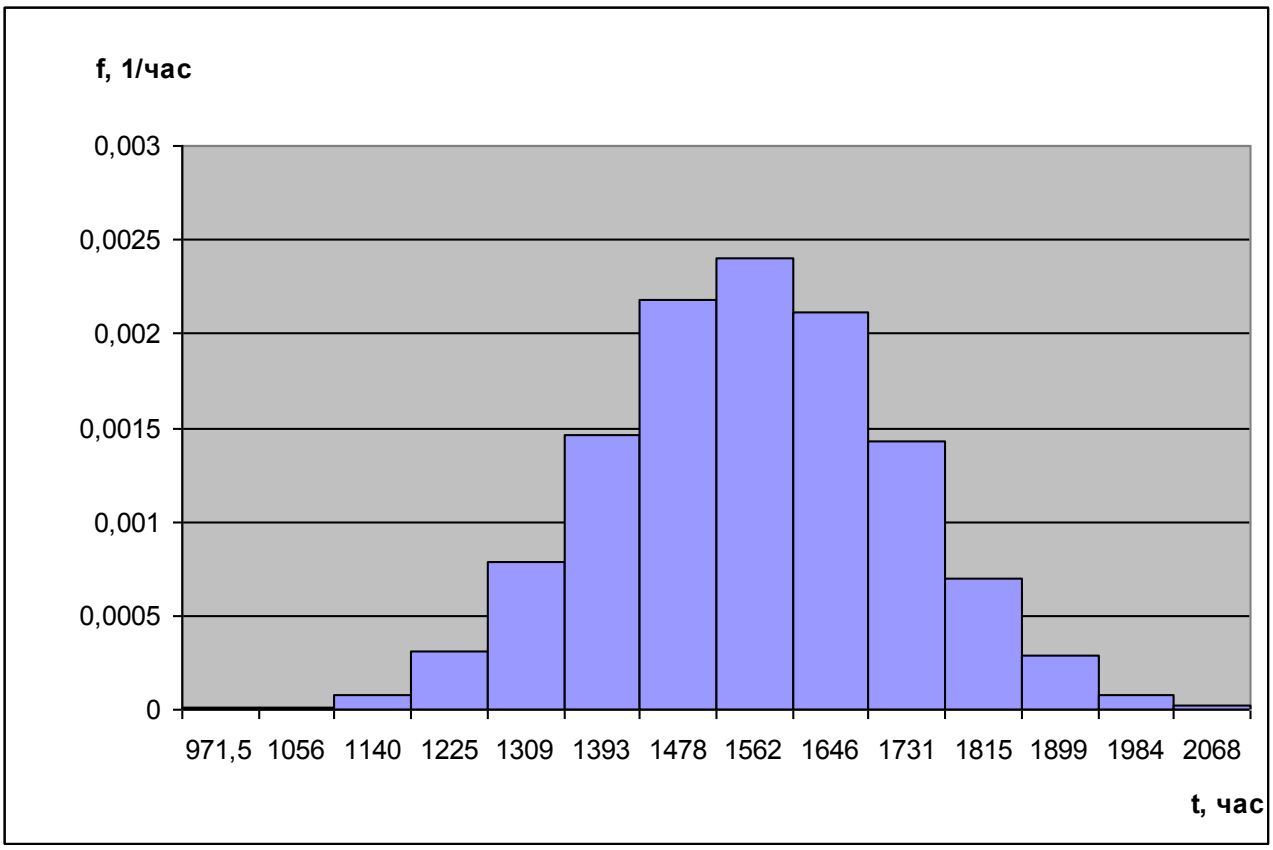


Рисунок 9.9 – Гистограмма функции распределения $f(t)$ от наработки t

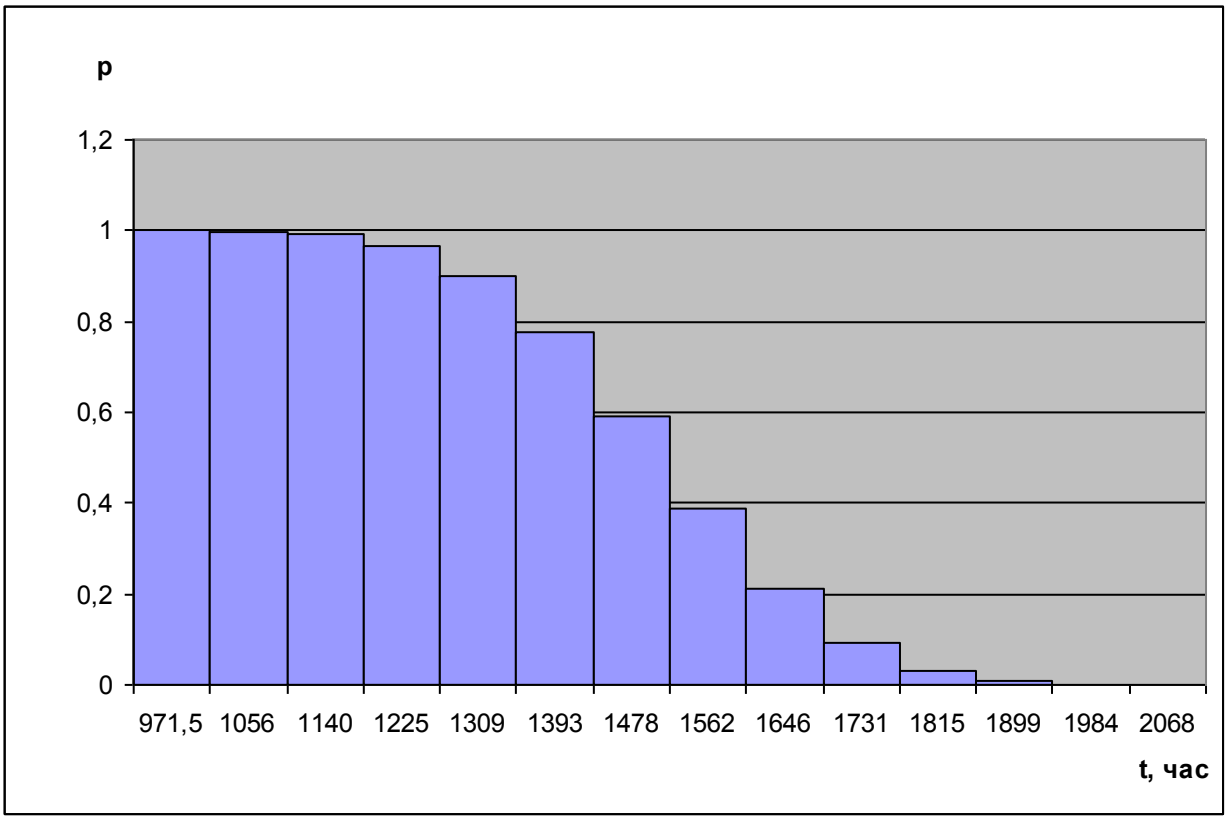


Рисунок 9.10 – Гистограмма вероятности безотказной работы $p(t)$

от наработки *t*

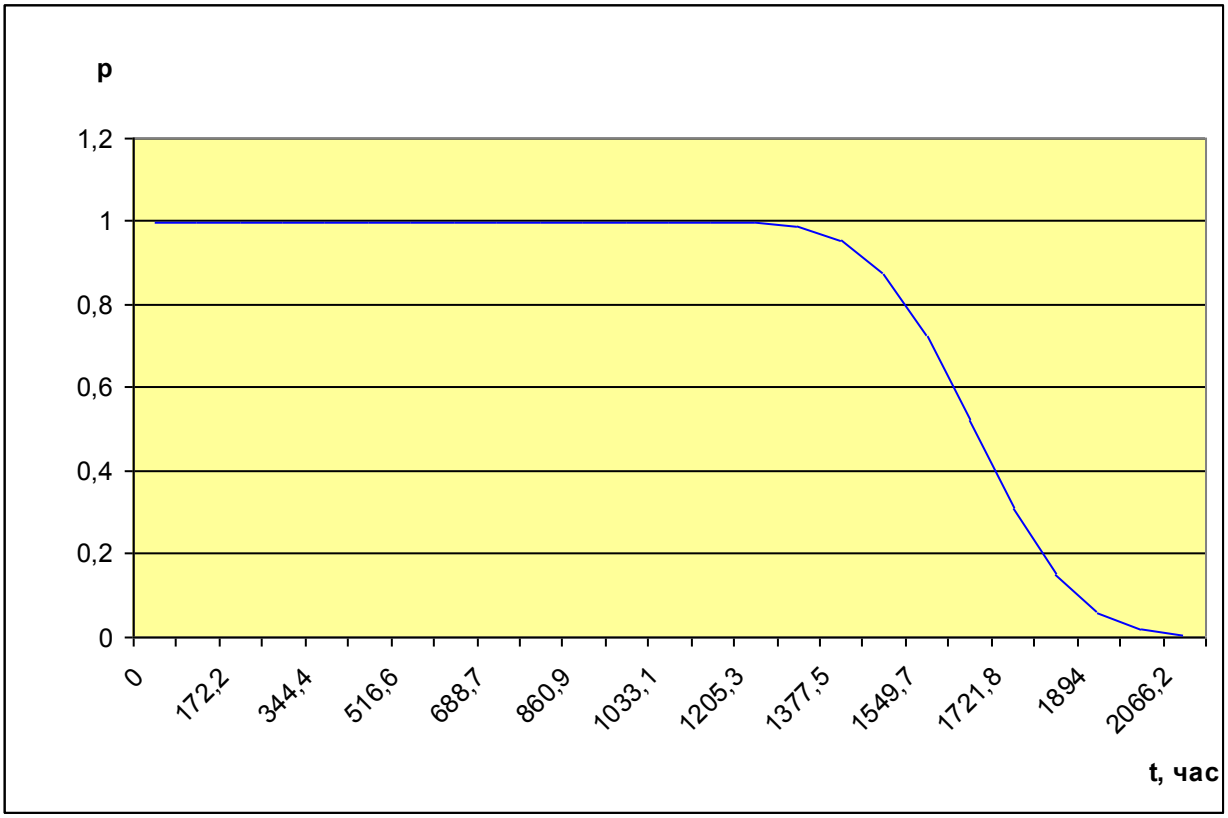


Рисунок 9.11 – Графическая зависимость $p(t)$ от наработки *t*

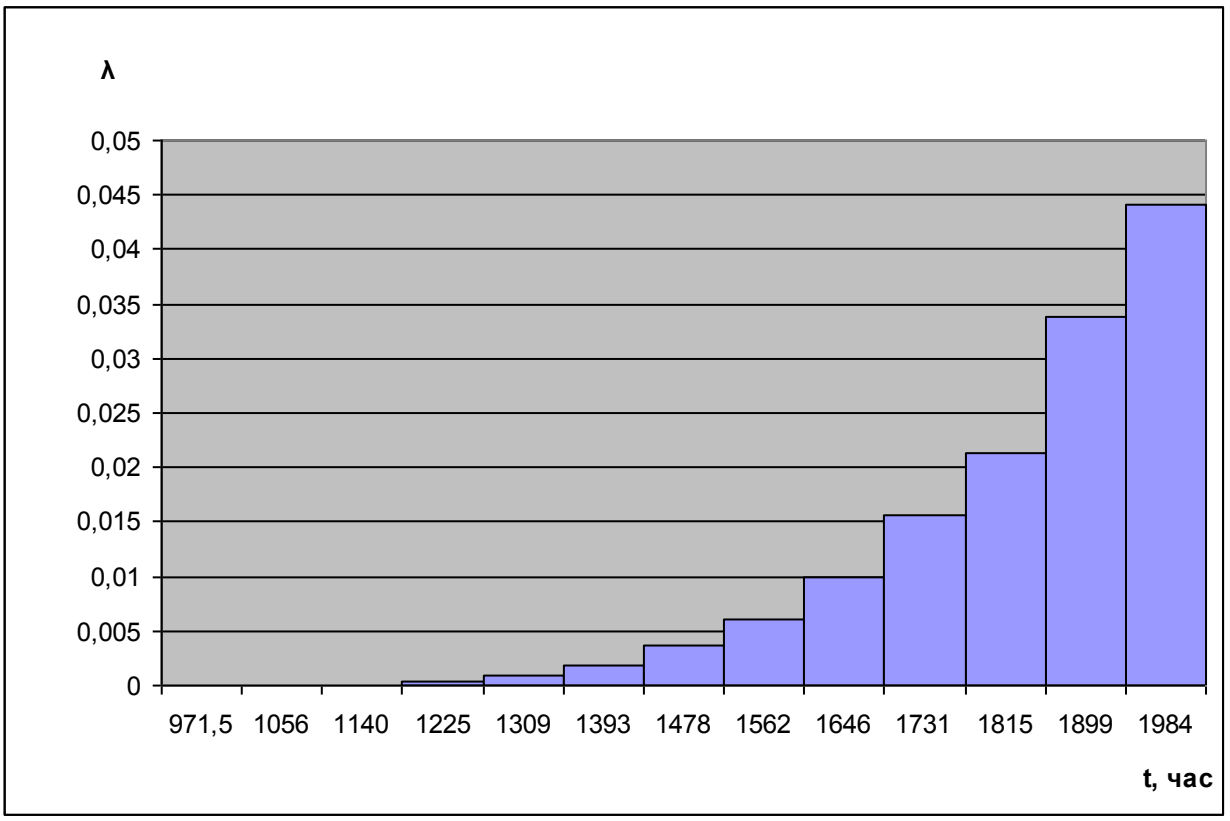


Рисунок 9.12 – Гистограмма интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ от наработки t

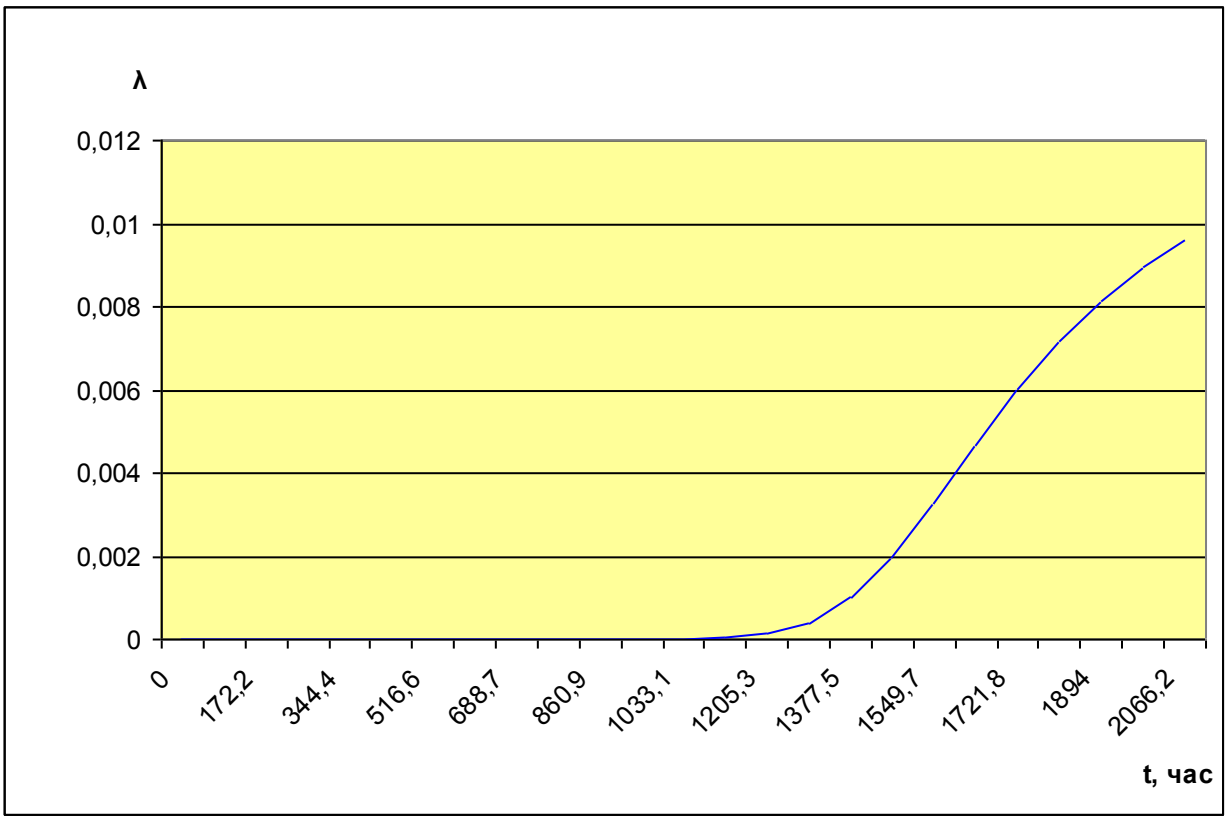


Рисунок 9.13 – Графическая зависимость $\lambda_i(t)$ от наработки t

Как видно из приведенных графиков, рассматриваемый элемент является ненадежным, так как до времени средней наработки до отказа доработали лишь 65% изделий.

Строим графические зависимости показателей надежности при ν = 0,05.

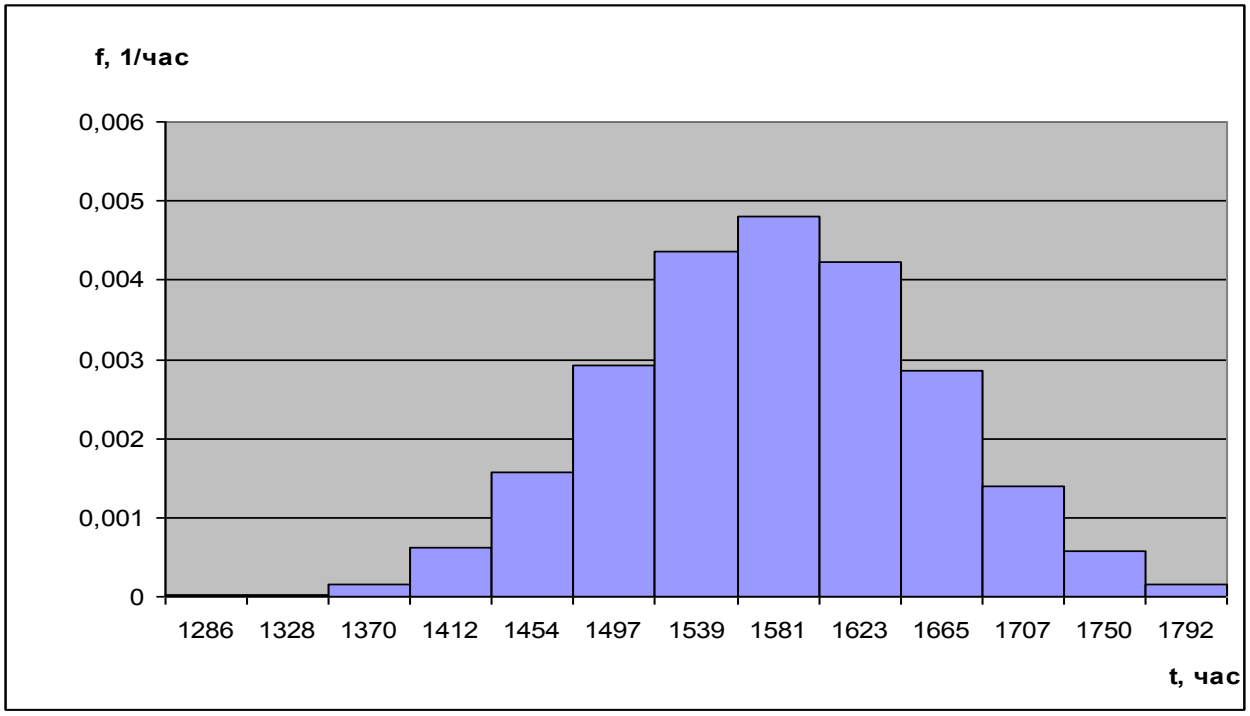


Рисунок 9.14 – Гистограмма функции распределения $f(t)$ от наработки *t*

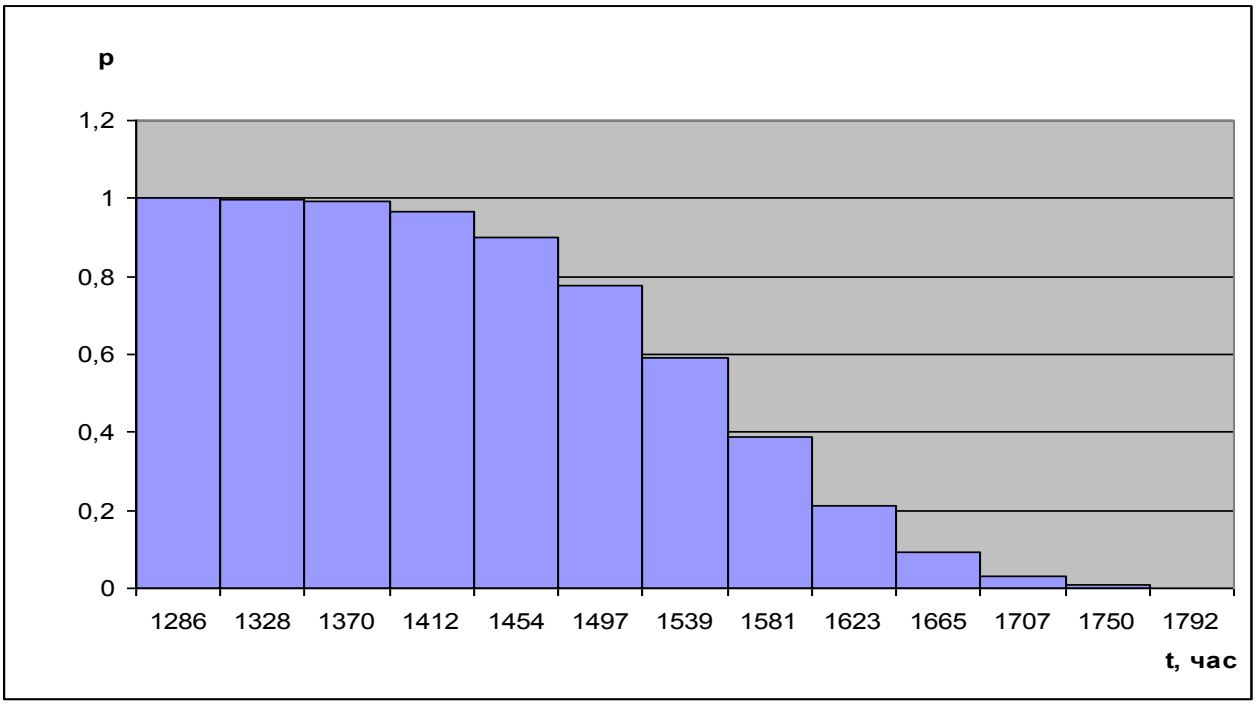


Рисунок 9.15 – Гистограмма вероятности безотказной работы $p(t)$ от наработки *t*

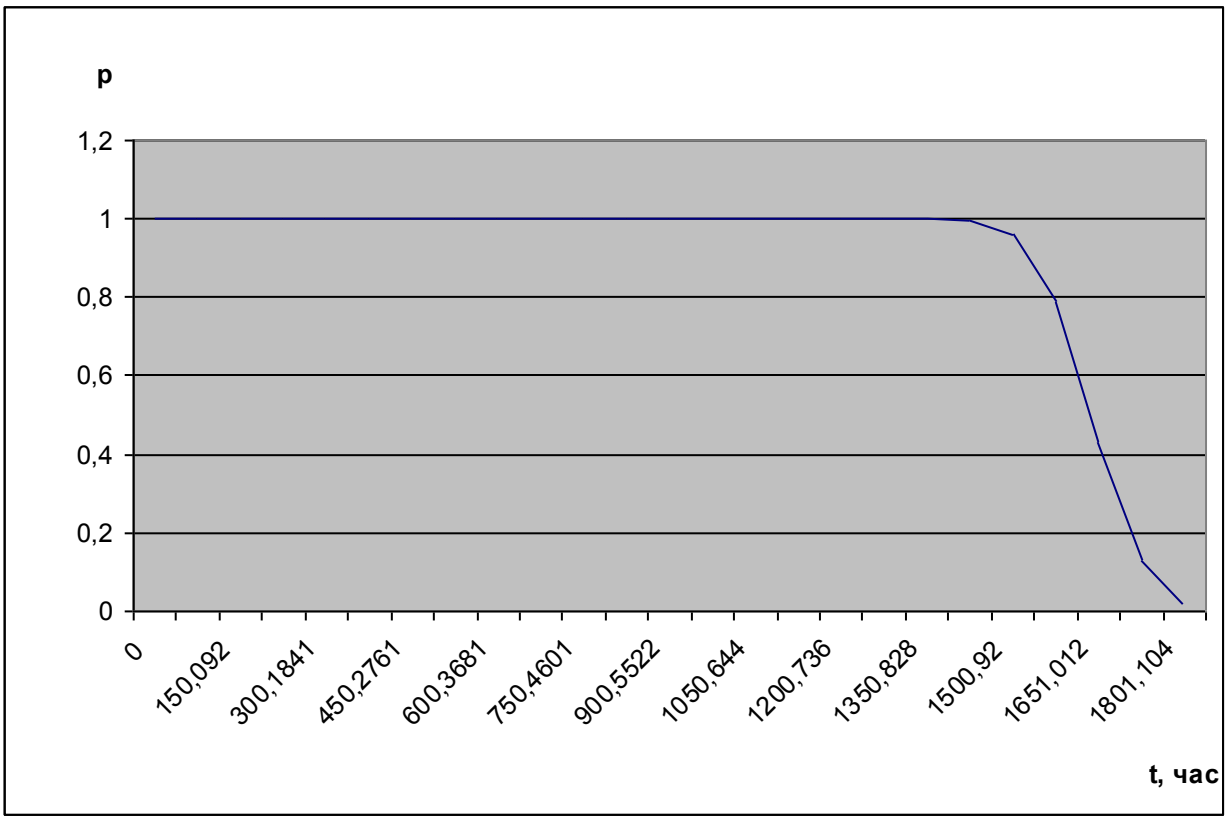


Рисунок 9.16 – Графическая зависимость $p(t)$ от наработки t

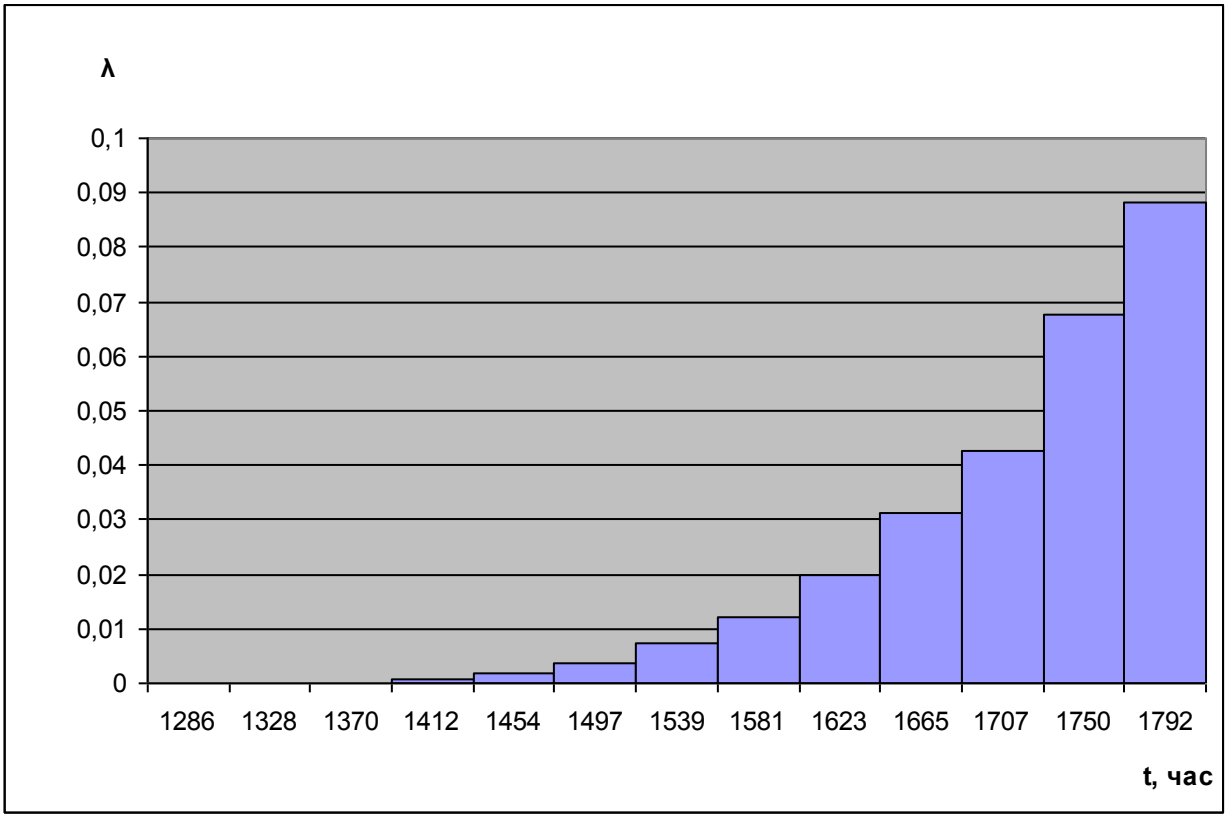


Рисунок 9.17 – Гистограмма интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ от наработки t

Рисунок 9.18 – Графическая зависимость $\lambda_i(t)$ от наработки *t*

Как видно из приведенных графиков, рассматриваемый элемент является ненадежным, так как до времени средней наработки до отказа доработали лишь 70% изделий.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель и задачи работы.
3. Результаты выполнения работы.
4.Ответы на контрольные вопросы.
Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие математического моделирования процесса эксплуатации технических объектов от экспериментальных исследований?
2. Чем отличаются графики рассмотренных в работе теоретических законов распределения случайной величины?

3. Какие показатели надежности рассмотрены в лабораторной работе?

4. Какой физический смысл отражают рассмотренные в работе показатели надежности технического объекта?

Практическая работа №10

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И РИСКА ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ НЕРЕЗЕРВИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы:

Изучение влияния показателей надежности нерезервированной технической системы на ее техногенный риск.

Время выполнения работы – 4 ч.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя вариант задания, который содержит значение времени жизни системы, значение допустимого риска, а также таблицу, аналогичную таблице 10.1.

2. Согласно пунктам работы выполнить все необходимые расчеты:

- определить наработку на отказ системы;
- исследовать функцию и коэффициент готовности системы;
- выполнить анализ риска системы.

Постановка задачи

Дано:

- число элементов нерезервированной системы n;
- интенсивности отказа и восстановления элемента системы i-го типа λ_i и μ_i;
- время работы системы T_P, усл. ед.;
- риск системы из-за отказа i-го элемента r_i, усл.ед.;
- допустимый риск системы $R_Д$, усл. ед.

Определить:

- наработку системы на отказ T, ч;
- функцию готовности системы $K_{\Gamma}(t)$;
- коэффициент готовности системы K_{Γ};
- техногенный риск системы $R_{c}(t)$, усл. ед.

Техногенный риск системы – комплексный показатель надежности. Он выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации технических систем. Иначе говоря, риск системы $R_{c}(t)$ – это вероятность возникновения аварийной ситуации. Риск системы может измеряться в усл. ед., т.е. в величине принесенного ущерба.

Теоретические данные для выполнения работы

Основными показателями надежности восстанавливаемых технических систем являются:
- наработка на отказ T, ч;
- функция готовности системы $K_{\Gamma}(t)$;
- коэффициент готовности K_{Γ}.

Для нерезервированной системы эти показатели вычисляются по следующим формулам

$$K_{\text{г}}(t) = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c} + \frac{\lambda_c}{\lambda_c} e^{-(\lambda_c + \mu_c)t} \; ; \qquad (10.1)$$

$$T = \frac{1}{\lambda_c}; \qquad (10.2)$$

$$\lambda_c = \sum_{1}^{n} \lambda_i; \qquad (10.3)$$

$$\mu_c = \frac{\lambda_c}{\sum_{1}^{n} \frac{\lambda_i}{\mu_i}}; \qquad (10.4)$$

$$K_{\text{г}} = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c}, \qquad (10.5)$$

где n – число элементов системы; t – текущий момент времени, час; λ_c – интенсивность отказа системы; μ_c – интенсивность

восстановления системы; λ_i и μ_i – интенсивности отказа и восстановления i-го элемента системы.

Для вычисления риска системы $R_c(t)$ целесообразно пользоваться следующими двусторонними оценками:

$$K_{\text{г}} \cdot t \sum_{1}^{n} \lambda_i \cdot r_i \le R_c(t) \le t \cdot \sum_{1}^{n} \lambda_i \cdot r_i, \qquad (10.6)$$

где $K_{\text{г}}$ – коэффициент готовности системы; r_i – риск системы из-за отказа i-го элемента, усл. ед.

Пример выполнения работы

Нерезервированная система имеет следующие данные:

- число элементов системы n=10;
- время жизни (долговечность или время работы) системы $T_{\text{р}}$=1000 ч;
- допустимый риск системы $R_{\text{д}} \le$ 2500 усл. ед.

Значения λ_i, μ_i, r_i для отдельных элементов системы приведены в таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Исходные данные задачи

Номер элемента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_i \cdot 10^{-4}, \div^{-1}$	1	0,23	0,36	0,054	0,72	0,83	0,08	0,25	0,6	1,2
r_i, усл. ед.	20	50	40	10^4	600	250	103	10	80	100
$\mu_i \cdot 10^{-1}, \div^{-1}$	0,2	0,3	0,5	2,0	1,0	1,2	7,0	0,5	1,0	1,0

Определение наработки на отказ системы

Интенсивность отказа системы определяется по формуле (10.3)

$$\lambda_c = \sum_{1}^{n} \lambda_i = 5{,}324 \cdot 10^{-3} \ \text{ч}^{-1}.$$

Наработка на отказ T определяется по формуле (10.2)

$$T = \frac{1}{\lambda_c} = 187{,}8 \text{ ч}.$$

Определение функции готовности и коэффициента готовности системы

Находим значение суммы элементов вектора

$$\sum_{1}^{n} \frac{\lambda_i}{\mu_i} = 102{,}367 \cdot 10^{-3}.$$

Далее находим μ_c по формуле (10.4).

$$\mu_c = \frac{\lambda_c}{\sum_1^{10} \frac{\lambda_i}{\mu_i}} = \frac{5{,}324 \cdot 10^{-3}}{102{,}367 \cdot 10^{-3}} = 0{,}052.$$

Исходя из полученных данных, находим по формуле (10.5) коэффициент готовности.

$$K_{\Gamma} = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c} = \frac{0{,}052}{0{,}005324 + 0{,}052} = 0{,}907.$$

Функцию готовности рассчитываем по формуле (10.1), результаты расчета оформляем в виде таблицы 10.2, в которой представлен расчет функции готовности рассматриваемого примера. При расчете функции готовности системы необходимо помнить, что число e = 2,718.

Таблица 10.2 – Функция готовности системы

t, ч	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$K_{\Gamma}(t)$	1,0	0,997737	0,994825	0,992347	0,989939	0,987599	0,985325	0,98311	0,980969	0,978882	0,976855

По данным таблицы 10.2 построим график функции готовности (рисунок 10.1).

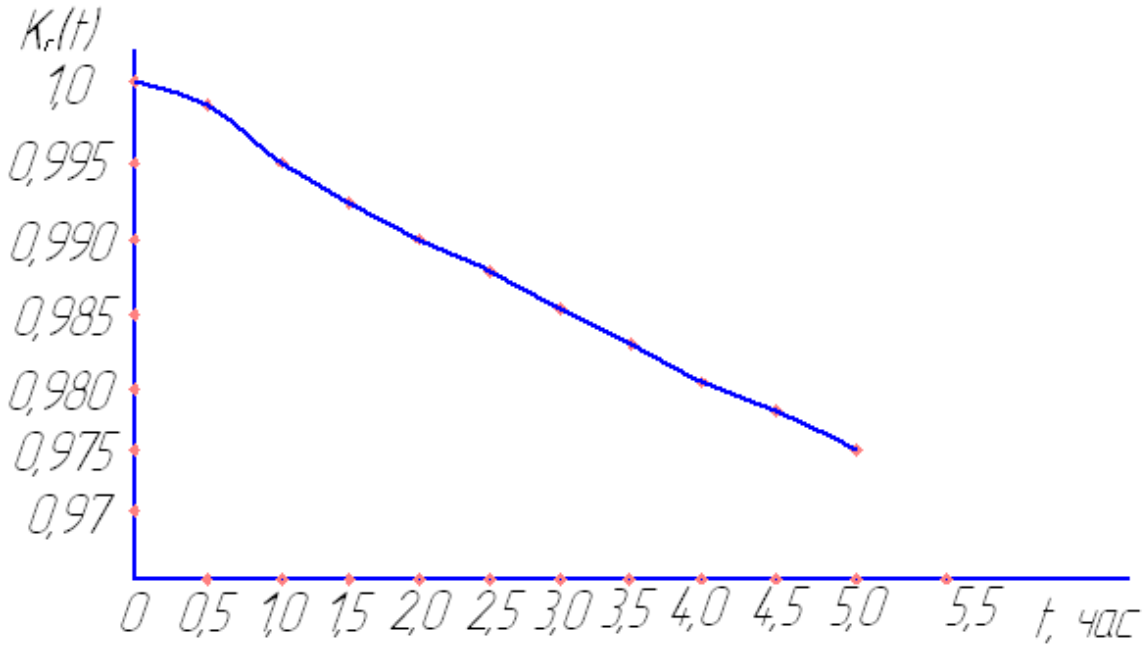


Рисунок 10.1 – График функции готовности технической системы

Анализ техногенного риска технической системы

Для расчета риска системы $R_C(t)$ используем выражение (10.6). Зная, что

$$K_\Gamma = 0{,}907, \sum_1^{10} \lambda_i \cdot r_i = 1475{,}9 \cdot 10^{-3},$$

находим значение левой и правой частей выражения (10.6).

$$K_\Gamma \cdot t \cdot \sum_1^{10} \lambda_i \cdot r_i = 0{,}97 \cdot 1000 \cdot 1475{,}9 \cdot 10^{-3} \geq 1339,$$

$$t \cdot \sum_1^{10} \lambda_i \cdot r_i = 1000 \cdot 1475 \cdot 10^{-3} \leq 1476,$$

$$t = T_Д = 1000 \div.$$

Значения риска находятся в интервале

$$1339 \leq R_C(1000) \leq 1476.$$

Риск системы можно считать приближенно равным среднеарифметическому из полученных оценок:

$$R_C(t) = \frac{1339 + 1476}{2} = 1407 \text{ усл.ед.}$$

Так как расчетное значение техногенного риска исследуемой системы меньше допустимого риска, равного 2500 усл. ед., то такая система пригодна к эксплуатации.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель и задачи работы.
3. Результаты выполнения работы.
4.Ответы на контрольные вопросы.

Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Что такое – техногенный риск?
2. От каких показателей зависит коэффициент готовности системы?
3. Какое влияние оказывает время работы системы на функцию готовности?
4. Перечислите показатели, влияющие на техногенный риск технической системы.

Практическая работа №11

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И РИСКА РЕЗЕРВИРОВАННОЙ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы:

Изучение влияния ремонта (восстановления) на надежность и риск технической системы.

Время выполнения работы – 6 ч.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя вариант задания, который содержит следующие данные:

- интенсивность отказа системы λ, ч $^{-1}$;
- время непрерывной работы системы t, ч;
- кратность резервирования m (m=1);
- риск из-за отказа системы r, усл. ед.;
- допустимый риск в течение времени t, усл. ед.

Варианты заданий представлены в таблице 11.4.

2. Согласно пунктам работы выполнить все необходимые расчеты:

- рассчитать наработку на отказ и коэффициент готовности системы, провести анализ полученных расчетных данных для различных методов резервирования;
- определить среднее время безотказной работы системы;
- определить риск системы и провести анализ риска для резервированной и нерезервированной систем.

Постановка задачи

Техническая система имеет следующие показатели:
- время непрерывной работы t, ч;
- интенсивность отказов λ, ч $^{-1}$;
- интенсивность восстановления μ, ч $^{-1}$;
- допустимая кратность резервирования m;
- риск из-за отказов системы r, усл. ед.;
- допустимый риск $R_Д$ в течение времени t, усл. ед.

Определить:
- показатели надежности и риска исходной нерезервированной системы;
- показатели надежности и риска резервированной системы с заданной кратностью резервирования m;
- эффективность резервирования и восстановления как средств повышения надежности и снижения риска техники.

Теоретические данные для выполнения работы

Основными показателями надежности восстанавливаемых систем являются:
- наработка на отказ T;
- функция готовности $K_г(t)$;
- коэффициент готовности $K_г$.

Эти показатели зависят от вида и кратности резервирования, дисциплины и качества ремонтно-обслуживающих воздействий.

Для повышения надежности техники наиболее часто применяются два вида резервирования: с постоянно включенным резервом и по методу замещения отказавшего элемента. При этом обслуживание и ремонт системы могут осуществляться с двумя видами приоритета – прямым и обратным. При прямом приоритете техника обслуживается в порядке поступления ее в ремонт. При обратном приоритете первой обслуживается техническая система, поступившая в ремонт последней.

Структурное резервирование с возможностью восстановления отказавших элементов в процессе функционирования системы является наиболее эффективным способом обеспечения и повышения надежности техники и снижения техногенного риска.

Однако применение резервирования удорожает технику и ее эксплуатацию. Поэтому кратность резервирования ограничена, и в большинстве случаев применяется резервирование с кратностью m=1 (дублирование). Из двух указанных видов резервирования наибольший рост надежности достигается при резервировании замещением. При этом этот вид резервирования имеет два недостатка:

- для его использования на практике требуется устройство для контроля состояния системы и коммутации при отказе работающей системы;
- снижается производительность системы, так как резервные элементы до отказа основных не работают.

С учетом недостатков резервирования замещением на практике наиболее часто применяется резервирование с постоянно включенным резервом надежности.

Наработка на отказ и коэффициент готовности резервированных восстанавливаемых систем при использовании одной ремонтно-обслуживающей бригады вычисляются по следующим формулам:

а) система с постоянно включенным резервом:

- одна обслуживающая бригада (n=1):

$$T = T_o\left(1 + \frac{1}{2p}\right), K_г = \frac{1 + 2p}{1 + 2p + 2p^2}; \qquad (11.1)$$

- две обслуживающие бригады (n=2):

$$T = T_o\left(1 + \frac{1}{2p}\right), K_г = \frac{1 + 2p}{1 + 2p + p^2}; \quad (11.2)$$

в) система замещением:

- одна обслуживающая бригада (n=1):

$$T = T_o\left(1 + \frac{1}{p}\right), K_г = \frac{1 + p}{1 + p + p^2}; \quad (11.3)$$

- две обслуживающие бригады (n=2):

$$T = T_o\left(1 + \frac{1}{p}\right), K_г = \frac{1 + p}{1 + p + 0{,}5p^2}; \quad (11.4)$$

где $p = \frac{\lambda}{\mu}; T_0 = \frac{1}{\mu}$.

Пример выполнения работы

Постановка задачи

Дано:

- время непрерывной работы t = 1000 ч;
- интенсивность отказа системы $\lambda = 10^{-4}$ ч $^{-1}$;
- интенсивность восстановления системы, определяемая значением $p = \frac{\lambda}{\mu}$, p = 1; 0,1; 0,05; 0,01;
- кратность резервирования m=1;
- риск из-за отказа системы r=150000 усл. ед.;
- допустимый риск в течение времени непрерывной работы R(1000) = 360 усл. ед.

Определение наработки на отказ T и коэффициента готовности $K_г$ системы

Расчеты производим по формулам (11.1)-(11.4) для двух способов резервирования.

Для рассматриваемого примера $T_0 = \frac{1}{\lambda} = 10000$ ч.

Расчеты производим для всех заданных значений p в пункте 3.1. Результаты расчетов сводим в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Результаты расчетов T и $K_г$.

p	1	0,1	0,05	0,01
$TP1/T_o$	1,5	6	11	51
$TP2/T_o$	1,5	6	11	51
$KP1$	0,6	0,984	0,995	0,9998
$KP2$	0,75	0,992	0,9977	0,9999
$TZ1/T_o$	2	11	21	101
$TZ2/T_o$	2	11	21	101
$KZ1$	0,667	0,991	0,9976	0,9999
$KZ2$	0,8	0,995	0,9988	0,99995

В таблице приняты следующие обозначения:

- $TP1$, $TP2$ – наработка на отказ системы с постоянно включенным резервом с одной и двумя ремонтными бригадами;
- $TZ1$, $TZ2$ – наработка на отказ системы, резервированной по принципу замещения с одной и двумя бригадами;
- $KP1$, $KP2$ – коэффициент готовности системы с постоянно включенным резервом с одной и двумя бригадами;
- $KZ1$, $KZ2$ – коэффициент готовности системы, резервированной по принципу замещения с одной и двумя бригадами.

Проводим анализ данных таблицы 11.1, исходя из полученных значений T и $K_г$ для двух способов резервирования системы:

- наработка на отказ системы с постоянно включенным резервом при использовании одной ремонтно-обслуживающей бригады и при использовании двух бригад не зависит от числа ремонтных бригад и одинакова при различных значениях p;
- при малых значениях p наработка на отказ системы замещением почти в два раза больше, чем при дублировании с постоянно включенным резервом;
- резервирование с восстановлением является эффективным средством повышения наработки на отказ системы, это видно из таблицы по значениям p от 1 до 0,01, которые зависят от интенсивности восстановления μ;
- число ремонтных бригад оказывает незначительное

влияние на коэффициент готовности системы, если число p мало;

- при малых значениях p (p=0,05...0,01) вид резервирования не влияет на величину коэффициента готовности.

Для сравнения необходимо найти коэффициент готовности исходной нерезервированной системы по формуле

$$K_{\text{г}} = \frac{1}{1+p}. \qquad (11.5)$$

Результаты расчета представлены в таблице 11.2.

Таблица 11.2 – Значения $K_{\text{г}}$ для нерезервированной системы

p	1	0,1	0,05	0,01
$K_{\text{г}}$	0,5	0,91	0,95	0,99

Сравнивая значения $K_{\text{г}}$ в таблицах 11.1 и 11.2, мы видим, что коэффициент готовности нерезервированной системы $K_{\text{г}}$ значительно ниже значений $K_{\text{г}}$ для резервированной системы при всех значениях величины p.

Определение среднего времени безотказной работы системы

Формулы для расчета среднего времени безотказной работы для различных способов резервирования имеют вид:

- система с постоянно включенным резервом:

$$T_{\text{б}} = T_o\left(1{,}5 + \frac{1}{2p}\right); \qquad (11.6)$$

- система с резервированием методом замещения:

$$T_{\text{б}} = T_o\left(1{,}5 + \frac{1}{2p}\right); \qquad (11.7)$$

где $T_o = \frac{1}{\lambda}$ – среднее время безотказной работы нерезервированной системы, T_o =1000 ч.

Определение риска системы

Риск системы определяем, приняв t = 1000 часов и m = 1.

Риск исходной нерезервированной системы определяется по формуле

$$R(t) = \frac{r\lambda t}{1+p}, \qquad (11.8)$$

где $R(t)$ – риск системы.

Риск резервированной системы с кратностью резервирования m=1 определяется по формулам:

- для постоянно включенного резерва:

$$R(t) = \frac{r\lambda 2p}{1+2p}; \qquad (11.9)$$

- для резерва замещением:

$$R(t) = \frac{tr\lambda p}{1+p}. \qquad (11.10)$$

Результаты расчета представлены в таблице 11.3.

Таблица 11.3 – Результаты расчета риска системы

Постоянно включенный резерв				
p	1	0,1	0,05	0,01
$R(t)$	10000	2500	1364	294
Резервирование замещением				
p	1	0,1	0,05	0,01
$R(t)$	7500	1364	714	149

Результаты расчетов техногенного риска системы $R(t)$ при t = 1000 ч и при двух видах резервирования показали (см. таблицу 11.3), что риск системы может быть меньше допустимого $R_Д$ = 360 усл. ед. при условии, что величина $p \leq$ 0,01. Это говорит о том, что на риск технической системы огромное влияние оказывает интенсивность восстановления системы.

Риск для исходной нерезервированной системы рассчитываем по приближенной формуле

$$R(t) = \frac{r\lambda t}{1+p}. \qquad (11.11)$$

При t = 1000 ч риск нерезервированной исходной системы будет равен при p≤ 0,01.

$$R(1000) = \frac{150000 \cdot 10^{-4} \cdot 1000}{1{,}01} = 14851 \text{ усл. ед.},$$

что выше допустимого.

Полученное значение риска говорит о том, что метод резервирования технической системы с целью повышения надежности позволяет значительно снизить риск системы и его последствия. Это видно из таблицы 11.3.

Таблица 11.4 – Варианты заданий

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
t, ч	600	700	650	1000	960	810	380	750	380	900	820	630	1000	750	600	520	680	940	860	770
$\lambda \cdot 10^{-4}$, $ч^{-1}$	1,2	2,1	1,1	0,8	1,6	1,3	1,5	1,0	0,8	1,2	1,6	0,7	2,1	1,8	1,0	1,05	0,9	1,3	1,4	1,2
$r \cdot 10^{3}$, усл. ед.	100	95	130	68	90	125	85	120	110	115	200	180	75	105	130	115	135	128	132	140
$R_{Д}$, усл. ед.	410	510	350	420	500	180	270	490	515	470	360	710	800	465	370	450	650	550	350	440

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель и задачи работы.
3. Результаты выполнения работы.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные показатели надежности резервированных систем.
2. Какие основные виды резервирования применяются для технических объектов?
3. Как влияет интенсивность восстановления на надежность резервированных систем?
4. Какое влияние оказывает резервирование на техногенный риск техники?

Практическая работа №12

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПРИЕМОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Цель работы:

Ознакомление с методами контроля надежности изделий в процессе их производства или ремонта на соответствующих предприятиях.

Время выполнения работы – 4 ч.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя вариант задания в виде таблицы 12.1 и выполнить все необходимые расчеты, представленные в пункте «Контроль надежности при $N \leq 500$».
2. Получить у преподавателя вариант задания в виде таблицы 12.2 и выполнить все необходимые расчеты, представленные в пункте «Контроль надежности при нормальном законе распределения наработки до отказа при

50≤ n≤ 0,1N».

Методы контроля надежности

Контроль надежности изделий имеет своей целью проверку соответствия надежности принятой партии установленному уровню. При этом конечным результатом, как правило, является одно из двух решений: принять партию изделий, считая их надежность удовлетворительной, или забраковать контролируемую партию как ненадежную.

Так как контроль надежности производится на основе испытаний выборки из партии произведенной продукции, то при принятии решений возможны два вида ошибок:

- ошибка первого рода: хорошая партия бракуется;
- ошибка второго рода: плохая партия принимается.

Вероятность ошибки первого рода называется риском поставщика и в расчетах обозначается буквой α. Вероятность ошибки второго рода называется риском заказчика и обозначается буквой β.

В практике контроля надежности пользуются главным образом методом однократной выборки (одиночный контроль) и последовательным методом.

Контроль надежности по методу однократной выборки

Метод однократной выборки заключается в том, что из контролируемой партии объема N изделий берется одна случайная выборка объема n экземпляров. Исходя из N, n и α или β устанавливаются оценочные нормативы A_0 и A_1. Если выборочное значение контролируемого параметра меньше или равно A_0, то партия признается надежной, если больше или равно A_1, партия бракуется.

Если контролируется число дефектных изделий в партии объема N, то при наличии в ней дефектных изделий $Д_0$ вероятность отказа $д_0$ определяется соотношением

$$д_0 = \frac{Д_0}{N}, \qquad (12.1)$$

и надежность считается высокой, близкой к оценочному нормативу A_0 при заданных α и β и при условии, что $Д_0$<0,1.

Если в партии N содержится $Д_1$ дефектных изделий в таком количестве, что надежность считается низкой при заданных α и β и при условии, что $д_1$≤ 0,1, то вероятность

отказа $д_1$ определяется соотношением

$$д_1 = \frac{Д_1}{N}. \qquad (12.2)$$

При наличии $Д_1$ дефектных изделий надежность партии N близка к нормативу A_1, и партия бракуется.

Оценочные нормативы A_0 и A_1 устанавливаются из следующих соотношений:

$$\alpha' = 1 - \sum_{d=0}^{A_0} C_{Д_0}^{d} f^d (1-f)^{Д_0 - d}; \qquad (12.3)$$

$$\beta' = \sum_{d=0}^{A_1 - 1} C_{Д_1}^{d} f^d (1-f)^{Д_1 - d}, \qquad (12.4)$$

где d – число дефектных изделий в выборке n; α' – риск поставщика, близкий к заданному α; β' – риск заказчика, близкий к заданному β. $C_{Д_0}^{d}$ – число сочетаний из $Д_0$ по d; $C_{Д_1}^{d}$ – число сочетаний из $Д_1$ по d.

$$f = \frac{n}{N}; \qquad (12.5)$$

$$C_{Д_0}^{d} = \frac{Д_0!}{d!\,(Д_0 - d)!} \qquad (12.6)$$

Факториал числа n (n!) вычисляется следующим образом. Возьмем 3!, тогда 3! = 3·2·1 = 6; 0! = 1 и $C_{Д_0}^{0}$ = 1.

Соотношения (12.3) и (12.4) используются, как правило, для партий изделий объемом $N \le 500$.

При контроле больших партий N > 500 и 50 ≤n≤ 0,1N со сравнительно невысокой надежностью, когда $n \cdot д_0 \ge 4$, при определении A_0 и A_1 можно пользоваться формулами:

$$\alpha' = 0{,}5 - \Phi_0 \left[\frac{A_0 - n \cdot д_0 + 0{,}5}{\sqrt{n \cdot д_0 (1 - д_0)}} \right]; \qquad (12.7)$$

$$\beta' = 0{,}5 - \Phi_0 \left[\frac{n \cdot д_1 + 0{,}5 - A_1}{\sqrt{n \cdot д_1 (1 - д_1)}} \right], \qquad (12.8)$$

где Φ_0 – функция Лапласа.

Примеры расчета контрольных параметров надежности по методу однократной выборки

Контроль надежности при N≤ 500

Контролю надежности подлежит партия из N = 200 изделий. Определить приемочное A_0 и браковочное A_1 числа дефектных изделий в выборке n = 40 изделий из партии N = 200. Партия считается надежной, если в ней содержится $Д_0$= 5% дефектных изделий и ненадежной, если $Д_1$= 10%.

Риск поставщика принят равным 0,20, а риск заказчика 0,10. Исходные данные задачи представлены в таблице 12.1.

Таблица 12.1 – Исходные данные задачи

N	n	$д_0$	$д_1$	α	β	f	$Д_0$	$Д_1$
200	40	0,05	0,1	0,2	0,1	0,2	10	20

Приемочное число A_0 определяется суммированием вероятностей $P(d<=A_0)$ биномиального распределения до величины α', близкой к α = 0,2.

Вероятности $P(d<=A_0)$ находим для d=0, 1, 2, 3 по формуле

$$P(d <= A_0) = \sum_{d=0}^{A_0} C_{Д_0}^{d} f^{d} (1-f)^{Д_0 - d}. \qquad (12.9)$$

Подставляя исходные данные в формулу (12.9), получаем:

$P(d$=0)=0,107; $P(d$=1)=0,268; $P(d$=2)=0,302; $P(d$=3)=0,201.

Суммируем эти вероятности в виде $\sum P(d <= 2)$ и $\sum P(d <= 3)$, получаем:

$$\sum P(d <= 2) = 0{,}678, \text{т. е.} (0{,}107 + 0{,}268 + 0{,}302);$$

$$\sum P(d <= 3) = 0{,}879, \text{т. е.} (0{,}107 + 0{,}268 + 0{,}302 + 0{,}201) .$$

Вычитаем полученные суммы из 1, согласно формуле (12.3), и принимаем A_0=2 с риском α'=0,322 или A_0=3 с риском поставщика α'=0,121.

Браковочное число A_1 определяется суммированием вероятностей $P(d<=A_1)$, найденных по формуле (12.4). В данном случае

$P(d=0)$=0,01; $P(d=1)$=0,06; $P(d=2)$=0,137; d=0, 1, 2.

Число A_1 должно быть близко к β=0,10.

$\sum P(d <= 1) = 0{,}07$, т. е $A_1 = 1$ с риском заказчика $\beta' = 0{,}07$;

$\sum P(d <= 2) \approx 0{,}21$, т. е. $A_1 = 2$ с риском заказчика $\beta' = 0{,}21$.

Для решения подобной задачи студент получает свой вариант исходных данных в виде таблицы 12.1 у преподавателя.

Контроль надежности при нормальном законе распределения наработки до отказа при 50≤n≤0,1N

Ускоренным испытаниям подвергнута партия гидроцилиндров, для которых удовлетворительной вероятностью безотказной работы в каждом цикле считается P=0,98. Тогда верояность отказа $д_0$ =1-0,98=0,02. Найти приемочное число отказов A_0 с допустимым риском α=0,05 для поставщика при объеме испытаний n=500 циклов.

Учитывая большой объем выборки, используем формулу (12.7) для определения приемочного отказов A_0. Так как $\alpha \approx 0{,}05$, то табулированная функция Лапласа $\Phi_0(z)$ равна

$$\Phi_0(z) = \Phi_0\left[\frac{A_0 - n \cdot д_0 + 0{,}5}{\sqrt{n \cdot д_0(1 - д_0)}}\right] = 0{,}45, \qquad (12.10)$$

т.е. $\Phi_0(z) = 0{,}5 - \alpha'$ или 0,5-0,05=0,45. Это следует из формулы (12.7). Из таблицы приложения А данной работы по значению $\Phi_0(z)$=0,45 находим значение параметра z=1,65.

Приемочное число отказов A_0 рассчитывается по формуле

$$A_0 = z \cdot \sqrt{n \cdot д_0(1 - д_0)} + n \cdot д_0 - 0{,}5. \qquad (12.11)$$

Подставив значения исходных данных задачи (см. таблицу 9.2) в выражение (12.11), получим приемочное число отказов A_0 =15.

Для решения данной задачи студент должен получить вариант у преподавателя в виде таблицы, аналогичной таблице 12.2. рассмотренного примера в пункте 2.2.

Таблица 12.2 – Исходные данные задачи

P	α	n	$д_0$
0,98	0,05	500	0,02

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель и задачи работы.
3. Результаты выполнения работы.
4.Ответы на контрольные вопросы.

Защитить отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Цель контроля надежности изделий.
2. Что такое риск поставщика и заказчика?
3. Какие ошибки возможны в процессе контроля надежности продукции?
4. Какие методы контроля надежности используются на практике?
5. В чем суть метода однократной выборки?

Таблица значений функции Лапласа (обязательное)

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

z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,00	0,00000	0,50	0,19146	1,00	0,34134	1,50	0,43319	2,00	0,47725	3,00	0,49865
0,01	0,00399	0,51	0,19497	1,01	0,34375	1,51	0,43448	2,02	0,47831	3,05	0,49886
0,02	0,00798	0,52	0,19847	1,02	0,34614	1,52	0,43574	2,04	0,47932	3,10	0,49903
0,03	0,01197	0,53	0,20194	1,03	0,34849	1,53	0,43699	2,06	0,48030	3,15	0,49918
0,04	0,01595	0,54	0,20540	1,04	0,35083	1,54	0,43822	2,08	0,48124	3,20	0,49931
0,05	0,01994	0,55	0,20884	1,05	0,35314	1,55	0,43943	2,10	0,48214	3,25	0,49942
0,06	0,02392	0,56	0,21226	1,06	0,35543	1,56	0,44062	2,12	0,48300	3,30	0,49952
0,07	0,02790	0,57	0,21566	1,07	0,35769	1,57	0,44179	2,14	0,48382	3,35	0,49960
0,08	0,03188	0,58	0,21904	1,08	0,35993	1,58	0,44295	2,16	0,48461	3,40	0,49966
0,09	0,03586	0,59	0,22240	1,09	0,36214	1,59	0,44408	2,18	0,48537	3,45	0,49972
0,10	0,03983	0,60	0,22575	1,10	0,36433	1,60	0,44520	2,20	0,48610	3,50	0,49977
0,11	0,04380	0,61	0,22907	1,11	0,36650	1,61	0,44630	2,22	0,48679	3,55	0,49981
0,12	0,04776	0,62	0,23237	1,12	0,36864	1,62	0,44738	2,24	0,48745	3,60	0,49984
0,13	0,05172	0,63	0,23565	1,13	0,37076	1,63	0,44845	2,26	0,48809	3,65	0,49987
0,14	0,05567	0,64	0,23891	1,14	0,37286	1,64	0,44950	2,28	0,48870	3,70	0,49989
0,15	0,05962	0,65	0,24215	1,15	0,37493	1,65	0,45053	2,30	0,48928	3,75	0,49991
0,16	0,06356	0,66	0,24537	1,16	0,37698	1,66	0,45154	2,32	0,48983	3,80	0,49993
0,17	0,06749	0,67	0,24857	1,17	0,37900	1,67	0,45254	2,34	0,49036	3,85	0,49994
0,18	0,07142	0,68	0,25175	1,18	0,38100	1,68	0,45352	2,36	0,49086	3,90	0,49995
0,19	0,07535	0,69	0,25490	1,19	0,38298	1,69	0,45449	2,38	0,49134	3,95	0,49996
0,20	0,07926	0,70	0,25804	1,20	0,38493	1,70	0,45543	2,40	0,49180	4,00	0,49997
0,21	0,08317	0,71	0,26115	1,21	0,38686	1,71	0,45637	2,42	0,49224	4,05	0,49997
0,22	0,08706	0,72	0,26424	1,22	0,38877	1,72	0,45728	2,44	0,49266	4,10	0,49998
0,23	0,09095	0,73	0,26730	1,23	0,39065	1,73	0,45818	2,46	0,49305	4,15	0,49998
0,24	0,09483	0,74	0,27035	1,24	0,39251	1,74	0,45907	2,48	0,49343	4,20	0,49999

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,25	0,09871	0,75	0,27337	1,25	0,39435	1,75	0,45994	2,50	0,49379	4,25	0,49999
0,26	0,10257	0,76	0,27637	1,26	0,39617	1,76	0,46080	2,52	0,49413	4,30	0,49999
0,27	0,10642	0,77	0,27935	1,27	0,39796	1,77	0,46164	2,54	0,49446	4,35	0,49999
0,28	0,11026	0,78	0,28230	1,28	0,39973	1,78	0,46246	2,56	0,49477	4,40	0,49999
0,29	0,11409	0,79	0,28524	1,29	0,40147	1,79	0,46327	2,58	0,49506	4,45	0,50000
0,30	0,11791	0,80	0,28814	1,30	0,40320	1,80	0,46407	2,60	0,49534	4,50	0,50000
0,31	0,12172	0,81	0,29103	1,31	0,40490	1,81	0,46485	2,62	0,49560	4,55	0,50000
0,32	0,12552	0,82	0,29389	1,32	0,40658	1,82	0,46562	2,64	0,49585	4,60	0,50000
0,33	0,12930	0,83	0,29673	1,33	0,40824	1,83	0,46638	2,66	0,49609	4,65	0,50000
0,34	0,13307	0,84	0,29955	1,34	0,40988	1,84	0,46712	2,68	0,49632	4,70	0,50000
0,35	0,13683	0,85	0,30234	1,35	0,41149	1,85	0,46784	2,70	0,49653	4,75	0,50000
0,36	0,14058	0,86	0,30511	1,36	0,41309	1,86	0,46856	2,72	0,49674	4,80	0,50000
0,37	0,14431	0,87	0,30785	1,37	0,41466	1,87	0,46926	2,74	0,49693	4,85	0,50000
0,38	0,14803	0,88	0,31057	1,38	0,41621	1,88	0,46995	2,76	0,49711	4,90	0,50000
0,39	0,15173	0,89	0,31327	1,39	0,41774	1,89	0,47062	2,78	0,49728	4,95	0,50000
0,40	0,15542	0,90	0,31594	1,40	0,41924	1,90	0,47128	2,80	0,49744	5,00	0,50000
0,41	0,15910	0,91	0,31859	1,41	0,42073	1,91	0,47193	2,82	0,49760		
0,42	0,16276	0,92	0,32121	1,42	0,42220	1,92	0,47257	2,84	0,49774		
0,43	0,16640	0,93	0,32381	1,43	0,42364	1,93	0,47320	2,86	0,49788		
0,44	0,17003	0,94	0,32639	1,44	0,42507	1,94	0,47381	2,88	0,49801		
0,45	0,17364	0,95	0,32894	1,45	0,42647	1,95	0,47441	2,90	0,49813		
0,46	0,17724	0,96	0,33147	1,46	0,42785	1,96	0,47500	2,92	0,49825		
0,47	0,18082	0,97	0,33398	1,47	0,42922	1,97	0,47558	2,94	0,49836		
0,48	0,18439	0,98	0,33646	1,48	0,43056	1,98	0,47615	2,96	0,49846		
0,49	0,18793	0,99	0,33891	1,49	0,43189	1,99	0,47670	2,98	0,4		

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Основные понятия о надежности и ремонте машин

Пользуясь литературой и стандартами, разберитесь в терминологии и определениях, принятых в надежности и ремонте машин, таких как исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное состояния, повреждение, отказ, техническое обслуживание, ремонт и др.

Обратите внимание на то, что надежность, как и качество, является сложным свойством, обусловливающимся целым рядом отдельных свойств: безотказностью, долговечностью, ремонтопригодностью и сохраняемостью.

Для количественной оценки этих свойств используются единичные и комплексные показатели.

Физические основы надежности машин

При эксплуатации машин в результате изнашивания деталей и действия других факторов нарушается их работоспособность и снижается надежность, возникают отказы и повреждения. Отказы классифицируют по нескольким признакам.

Для повышения надежности машин при их проектировании, изготовлении, ремонте и эксплуатации проводят конструктивно-технологические, организационные и другие мероприятия, направленные на уменьшение скорости изнашивания деталей, предупреждение появления отказов и повреждений. Это невозможно сделать без знания теории трения и изнашивания и протекающих при этом процессов. Изучая тему, следует особое внимание уделить физической сущности, закономерностям, видам и динамике изнашивания для различных условий работы деталей. Нужно четко усвоить разницу между понятиями изнашивание и износ.

Виды трения, смазки и изнашивания классифицируют по ГОСТ 23002-78. Кроме износов, детали могут иметь другие дефекты: изгиб, усталостное и коррозионное разрушение, потеря упругости и так далее. Необходимо знать причины их

появления и методы обнаружения.

Методы определения показателей надежности

Для изучения методов определения показателей надежности нужно изучить соответствующую литературу. Отказы и повреждения машин являются случайными событиями, поэтому и показатели надежности – случайные величины. Для их определения используют основы теории вероятностей и математической статистики, которые предусматривают определенный порядок сбора и обработки статистической информации, методы расчетов числовых характеристик единичных и комплексных показателей надежности.

Методика обработки зависит от вида информации, которая может быть полной, усеченной, многократно усеченной, а сама обработка может выполняться как аналитическим, так и графическими методами.

Изучая этот подраздел, важно понять, что для объективной оценки надежности всей генеральной совокупности данных объектов по результатам испытаний их выборочной совокупности нужно правильно (с помощью критериев согласия) выбрать теоретический закон распределения показателей надежности, определить его параметры. Закрепление полученных знаний по методике расчета показателей безотказности с использованием статистических методов обработки данных осуществляется при выполнении контрольной работы.

Предельные и допустимые значения параметров технического состояния машин

Под предельным понимают такое состояние объекта (детали, агрегата или машины), при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно. Допустимым значением параметра (износа детали, зазора в соединении и др.) называют такое, при котором остаточный ресурс детали (соединения и др.) не меньше межремонтного ресурса машины или агрегата. Допустимые значения тем меньше, чем больше нормативный межремонтный ресурс машины. Поэтому для увеличения межремонтного ресурса

отремонтированных машин нужно особенно ответственно устанавливать и затем соблюдать допустимые износы и другие параметры деталей. Для закрепления знаний по этой теме целесообразно ознакомиться с техническими требованиями на ремонт какой-либо машины, в которых установлены критерии предельного состояния, даны предельные и допустимые значения параметров.

Задания и указания по выполнению контрольной работы

Общие указания

Контрольная работа состоит из двух частей: теоретической и практической. Теоретическая часть работы предполагает изучение специальной литературы. Практическая часть содержит задачи по определению показателей надежности машин. К выполнению контрольных работ рекомендуется приступить после ознакомления с методическими указаниями и проработки основной и дополнительной литературы. Отвечая на вопросы, не следует переписывать книжный текст, содержание ответов нужно излагать своими словами. Перед каждым ответом необходимо поместить текст вопроса. При расчетах дать пояснения всех принятых обозначений, входящих в формулу, с указанием их числовых значений. Промежуточные расчеты также должны быть записаны в тетрадь. Расчетные схемы, графики следует выполнять карандашом на миллиметровой бумаге в принятом масштабе. При обозначении величин, их числовых значений необходимо пользоваться единицами измерения в системе СИ. Для замечаний рецензента на каждой стороне надо оставлять поля шириной 25-30 мм.

Задание на выполнение каждой контрольной работы изложено на отдельном бланке, который следует подклеить на оборотной стороне титульного листа работы. В конце работы указать перечень используемой литературы. Работа должна быть подписана и указана дата ее выполнения.

Задание включает три вопроса по первому разделу программы дисциплины и определение показателей надежности по второму разделу. Условия практических задач

№ 1-4 и статистические данные указаны в задании для каждой задачи, для задачи №4 варианты статистического ряда представлены в таблице приложения А методических указаний. Задание на контрольную работу выдает преподаватель.

Вопросы для выполнения контрольной работы

1. Задачи повышения надежности отремонтированной сельскохозяйственной техники.

2. Причины нарушения работоспособности и снижения надежности машин.

3. Общие понятия, применяемые в надежности: исправность, неисправность, предельное состояние, работоспособное и неработоспособное состояние, повреждение, отказ и другие.

4. Что такое надежность сельскохозяйственной техники?

5. Что такое техническое обслуживание и ремонт машин?

6. Что такое наработка, технический ресурс, срок службы, срок сохраняемости и каковы единицы их измерения?

7. Поясните термины, относящиеся к свойствам технического объекта: безотказность, долговечность, ремонтопригодность, сохраняемость.

8. Что такое гамма-процентный ресурс, его практическое значение?

9. Поясните понятия гарантийная наработка (ресурс) и срок гарантии.

10. Объекты, рассматриваемые в надежности сельскохозяйственной техники: технический объект, техническая система, элементы технической системы.

11. Продукция, виды продукции, ее свойства и качество.

12. Группы признаков качества продукции.

13. Какова связь между качеством технического объекта и его надежностью?

14. Каковы причины отказов сельскохозяйственной техники?

15. Значение качества и надежности машин в повышении эффективности использования сельскохозяйственной техники.

16. Охарактеризуйте основные виды отказов технических объектов.

17. Какова физическая природа возникновения постепенных и внезапных отказов?

18. Опишите кратко внешние и внутренние факторы, снижающие надежность технических объектов.

19. Приведите классификацию видов трения в машинах и влияние трения на изнашивание.

20. Виды изнашивания деталей. Факторы, влияющие на

изнашивание, сущность этого влияния.

21. Приведите классификацию видов смазки и их характеристику.

22. Понятие о механическом изнашивании деталей. Меры борьбы с этим видом изнашивания. Приведите примеры.

23. Абразивное и гидроабразивное (газообразивное) изнашивание деталей. Сущность процессов, условия протекания. Меры борьбы с этими видами изнашивания. Поясните на примере изнашивания деталей сельскохозяйственной техники.

24. Эрозионное, гидроэрозионное (газоэрозионное), усталостное, кавитационное изнашивание деталей. Сущность процессов, условия протекания. Меры борьбы с этими видами изнашивания. Приведите примеры.

25. Коррозионно-механическое изнашивание деталей: окислительное, изнашивание при фреттинг-коррозии. Сущность процессов, условия протекания. Меры борьбы с этим видом изнашивания. Приведите примеры.

26. Мероприятия по уменьшению интенсивности изнашивания деталей машин и уменьшению влияния износов на качественные показатели работы машин.

27. Изнашивание при заедании, электроэрозионное изнашивание.

28. Когда и как используются основные закономерности изнашивания деталей (при конструировании, эксплуатации и ремонте машин)?

29. Как влияет макро- и микрогеометрия поверхностей на изнашивание деталей машин? Оптимальная микрогеометрия поверхностей.

30. Методы определения износов деталей машин и область их применения.

31. Что такое предельное состояние (износ) машин, соединений и деталей?

Опишите критерии предельного состояния и методы их определения. Приведите примеры.

32. Допустимые и предельные значения износа деталей при ремонте машин. Зависимость между ними.

33. Порядок расчета остаточного и полного технического ресурса детали.

34. Порядок расчета остаточного и полного ресурса соединения.

35. Потеря работоспособности деталей из-за усталости металла.

36. Коррозионные повреждения деталей и узлов, условия протекания коррозии и меры борьбы с ней. Приведите примеры.

37. Приведите классификацию отказов машин.

38. Охарактеризуйте основные понятия теории вероятностей: испытание (опыт), событие, случайная величина, частота, частность, вероятность и др.

39. Понятие показателя надежности. Единичные и комплексные показатели надежности.

40. Какими показателями характеризуется безотказность технических объектов?

41. Какими показателями характеризуется долговечность технических объектов?

42. Коэффициент готовности технических объектов. Свойства, характеризующиеся этим показателем.

43. Изложите основы технической диагностики и прогнозирования ресурсов технических систем и их элементов.

44. Цель и задачи технической диагностики.

45. Каковы цель, назначение и особенности испытаний сельскохозяйственной техники на надежность?

46.Приведите классификацию методов испытания и контроля надежности сельскохозяйственной техники.

47. Опишите виды испытаний сельскохозяйственной техники на надежность.

48. Сущность стендовых и полигонных испытаний.

49. Ускоренные испытания на надежность, их достоинства и недостатки.

50. Технические средства ускоренных испытаний на надежность.

51. Опишите эксплуатационные испытания на надежность.

52. Изложите порядок обработки статистических данных о надежности сельскохозяйственной техники при ее эксплуатации и ремонте.

53. Контрольные испытания машин на полигонах и машинно-испытательных станциях.

54. Предремонтное диагностирование тракторов. Цель и

задачи этого технологического процесса.

55. Перечислите основные требования к ремонтопригодности сельскохозяйственной техники.

56. Требования к ремонтопригодности при текущем и капитальном ремонте сельскохозяйственной техники.

57. Перечислите основные конструктивные мероприятия повышения надежности машин.

58. Назначение и сущность резервирования в технических системах. Виды резервирования.

59. Перечислите основные технологические мероприятия повышения надежности машин.

60. Изложите мероприятия конструктивно-технологического характера, направленные на повышение надежности машин.

Практическая часть работы

Практическая часть работы состоит из четырех задач по определению показателей безотказности технических объектов.

Цель работы: освоить методику расчета показателей безотказности машин.

Общие положения. Надежность является комплексным свойством изделия, которое включает безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость.

Безотказность – это свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки. В соответствии с ГОСТ 27.002-83 «Надежность в технике. Термины и определения» безотказность восстанавливаемых изделий оценивается следующими показателями:

1 – наработка на отказ;

2 – параметр потока отказов;

3 – вероятность безотказной работы;

4 – интенсивность отказов;

5 – частота отказов.

В данной работе необходимо рассчитать показатели безотказности машин на основе статистических данных.

Порядок выполнения работы. Работа выполняется по вариантам для всех четырех задач. Для каждого варианта

информация представлена в виде статистической выборки.

Задача №1.

На испытания поставлено N_0 изделий. За время t вышло из строя $n(t)$ штук изделий. За последующий интервал времени $Дt$ вышло из строя $n(Дt)$ штук изделий. Необходимо вычислить вероятность безотказной работы за время t и $t + Дt$, частоту отказов $\lambda(Дt)$ и интенсивность отказов $\mu(Дt)$ на интервале $Дt$.

Дано: N_0=10; t=1000 ч; $Дt$=100 ч; $n(t)$= 3; $n(Дt)$=1.
Найти P(t) - ? P(t+$Дt$)-? $\lambda(Дt)$ - ? $\mu(Дt)$ -?

Решение:

Определяем вероятность безотказной работы за время t.

$$P(t)= \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \qquad (1)$$

$$P(1000)= \frac{10-3}{10} = 0{,}7.$$

Вероятность безотказной работы за время t+ $Дt$=1100 ч.

$$P(1100)= \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \qquad P(1100)= \frac{10-4}{10} = 0{,}6.$$

Найдем частоту отказов за время $Дt$.

$$\lambda(100)= \frac{n(Дt)}{N_0 \cdot Дt}. \qquad (2)$$

$$\lambda(100)= \frac{1}{10 \cdot 100} = 1 \cdot 10^{-3}\ ч^{-1}.$$

Найдем интенсивность отказов за время $Дt$.

$$\mu(100) = \frac{n(Дt)}{Дt \cdot N_{ср}}, \qquad (3)$$

где $N_{ср} = \frac{N_0(t)+N_0(Дt)}{2}$; $N_0(t)$ = 997 шт.; $N_0(Дt)$ – 996 шт.

$$\mu(100) = \frac{1}{100 \cdot \frac{(997+996)}{2}} = 1 \cdot 10^{-5}\ ч^{-1},$$

Ответ: P(t)=0,7; P(t+$Дt$)=0,6; $\lambda(t)$= $1 \cdot 10^{-3} ч^{-1}$; $\mu(t)$= $1 \cdot 10^{-5} ч^{-1}$.

Задача №2.

В течение времени $Дt$ производилось наблюдение за восстанавливаемым изделием и было зафиксировано $n(Дt)$ отказов. До начала наблюдения изделие проработало в течение времени t_1, общее время наработки к концу наблюдения составило t_2. Требуется найти среднюю наработку на отказ tcp.

Дано: t_1=1200 ч; t_2=5558 ч, $n(Дt)$=2.

Решение:

Найдем наработку изделия за наблюдаемый период.

$t = t_1 - t_2$ = 5558 – 1200 = 4358 ч.

Принимая $\sum_{i=1}^{n} t_i$ = 4358 ч, находим среднюю наработку на отказ:

$$tcp = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} = \frac{4358}{2} = 2179. \quad (4)$$

где t_i – время исправной работы изделия между (i-1) и i-м отказами; n – число отказов за некоторое время t.

Ответ: Наработка на отказ равна 2179 ч.

Задача №3.

Изделие имеет среднюю наработку на отказ $t_{ср}$ и среднее время восстановления $t_в$. Необходимо определить коэффициент готовности изделия $K_г$.

Дано: $t_{ср}$= 147 ч, $t_в$= 1,7 ч.

Решение:

Находим коэффициент готовности по формуле

$$K_г = \frac{t_{ср}}{t_{ср} - t_B} = \frac{1}{1+\frac{t_B}{tcp}} = \frac{1}{1+\frac{1.7}{143}} = 0{,}988. \quad (5)$$

Ответ: Коэффициент готовности изделия равен 0,988.

Задача №4.

В результате наблюдений за N_0=45 образцами технических изделий в течение 80 мото-часов наработки получены данные до первого отказа всех 45 образцов.

Определить: P(t); $\lambda(t)$; $\mu(t)$ в функции времени, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа Tcp.

Распределение отказов для всех испытуемых образцов по интервалам наработки представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Значения интервалов наработки $Дti$ и числа отказов в них $n(Дti)$

$Дti$,ч	$n(Дti)$	$Дti$,ч	$n(Дti)$
0-5	1	40-45	0
5-10	5	45-50	1
10-15	8	50-55	0
15-20	2	55-60	0
20-25	5	60-65	3
25-30	6	65-70	3
30-35	4	70-75	3
35-40	3	75-80	1

Дано: N_0 = $n(Дti)$=45; $Дt$= 5 ч.

Определить: P(t) - , $\lambda(t)$ -, $\mu(t)$ -, Tcp - .

Решение:

Определим вероятность безотказной работы по формуле

$$P(t)=\frac{N_0-n(t)}{N_0}, \qquad (6)$$

где $n(t)$ – сумма отказов, зарегистрированных в конце i-го интервала.

P(5) = $\frac{45-1}{45}$ = 0,98; P(10) = $\frac{45-6}{45}$ = 0,87;

P(15) = $\frac{45-14}{45}$ = 0,69;

P(20) = $\frac{45-16}{45}$ = 0,64; P(25) = $\frac{45-21}{45}$ = 0,53;

P(30) = $\frac{45-27}{45}$ = 0,4;

P(35) = $\frac{45-31}{45}$ = 0,31; P(40) = $\frac{45-34}{45}$ = 0,24;

P(45) = $\frac{45-34}{45}$ = 0,24;

P(50) = $\frac{45-35}{45}$ = 0,22; P(55) = $\frac{45-35}{45}$ = 0.22;

P(60) = $\frac{45-35}{45}$ = 0,22;

P(65) = $\frac{45-38}{45}$ = 0,16; P(70) = $\frac{45-41}{45}$ = 0,09;

P(75) = $\frac{45-44}{45}$ = 0,02;

P(80) = $\frac{45-45}{45}$ =0.

Найдем частоту отказов по формуле

$$\lambda(t_{ср})=\frac{n(Дti)}{N_0 \cdot Дt}, \qquad (7)$$

где $t_{ср}$ – середина i-го интервала.

λ(2,5)=$\frac{1}{45\cdot5}$ = 0,44·10^{-2}; λ(7,5)=$\frac{5}{45\cdot5}$ = 2,22·10^{-2};

λ(12,5)=$\frac{8}{45\cdot5}$ = 3,55·10^{-2};

λ(17,5)=$\frac{2}{45\cdot5}$=0,88·10^{-2}; λ(22,5)=$\frac{5}{45\cdot5}$=2,22·10^{-2};

λ(27,5)=$\frac{6}{45\cdot5}$ = 2,66·10^{-2};

λ(32,5)=$\frac{4}{45\cdot5}$ = 1,77·10^{-2}; λ(37,5)=$\frac{3}{45\cdot5}$ = 1,33·10^{-2}; λ(42,5)= 0;

λ(47,5)=$\frac{1}{45\cdot5}$ = 0,44·10^{-2}; λ(52,5)= 0; λ(57,5)= 0;

λ(62,5)=$\frac{3}{45\cdot5}$ = 1,33·10^{-2};

λ(67,5)=$\frac{3}{45\cdot5}$=1,33·10^{-2}; λ(72,5)=$\frac{3}{45\cdot5}$=1,33·10^{-2};

λ(77,5)=$\frac{1}{45\cdot5}$= 0,44·10^{-2}.

Найдем интенсивность отказов по формуле

$$\mu(t_{ср}) = \frac{n(Дt)}{Дt \cdot N_{ср}}, \qquad (8)$$

где $N_{ср} = \frac{N_0(t)+N_0(Дt)}{2}$; $N_0(t)$ – количество отказов, не зарегистрированных в начале i-го интервала от общего числа отказов N_0;

$N_0(Дt)$ – количество отказов, не зарегистрированных в конце i-го интервала от общего числа отказов N_0.

$\mu(2,5) = \frac{1}{5\cdot\frac{(45+44)}{2}} = 0{,}45\cdot10^{-2}$; $\mu(7,5) = \frac{5}{5\cdot\frac{(44+39)}{2}} = 2{,}40\cdot10^{-3}$;

$\mu(12,5) = \frac{8}{5\cdot\frac{(39+31)}{2}} = 4{,}57\cdot10^{-3}$;

$\mu(17,5) = \frac{2}{5\cdot\frac{(31+29)}{2}} = 1{,}33\cdot10^{-2}$; $\mu(22,5) = \frac{5}{5\cdot\frac{(29+24)}{2}} = 3{,}77\cdot10^{-2}$;

$\mu(27,5) = \frac{6}{5\cdot\frac{(24+18)}{2}} = 5{,}71\cdot10^{-2}$;

$\mu(32,5) = \frac{4}{5\cdot\frac{(18+14)}{2}} = 5\cdot10^{-2}$; $\mu(37,5) = \frac{3}{5\cdot\frac{(14+11)}{2}} = 4{,}8\cdot10^{-2}$;

$\mu(42,5) = 0$;

$\mu(47,5) = \frac{1}{5\cdot\frac{(11+10)}{2}} = 1{,}90\cdot10^{-2}$; $\mu(52,5) = 0$; $\mu(57,5) = 0$;

$\mu(62,5) = \frac{3}{5\cdot\frac{(10+7)}{2}} = 7{,}05\cdot10^{-2}$;

$\mu(67,5) = \frac{3}{5\cdot\frac{(7+4)}{2}} = 10{,}9\cdot10^{-2}$; $\mu(72,5) = \frac{3}{5\cdot\frac{(4+1)}{2}} = 24\cdot10^{-2}$;

$\mu(77,5) = \frac{1}{5\cdot\frac{(1+0)}{2}} = 40\cdot10^{-2}$.

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения P(t), $\lambda(t)$, $\mu(t)$, вычисленные для всех $Дti$

$Дti$,ч	P(t)	$\lambda(t)$,$\cdot10^{-2}$ч	$\mu(t)$,$\cdot10^{-2}$ч
1	2	3	4
0-5	0,98	0,44	0,45
5-10	0,87	2,22	2,40
10-15	0,69	3,55	4,57
15-20	0,64	0,88	1,33

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
20-25	0,53	2,22	3,77
25-30	0,4	2,66	5,71
30-35	0,31	1,77	5
35-40	0,24	1,33	4,8
40-45	0,24	0	0
45-50	0,22	0,44	1,90
50-55	0,22	0	0
55-60	0,22	0	0
60-65	0,16	1,33	7,05
65-70	0,09	1,33	10,9
70-75	0,02	1,33	24
75-80	0	0,44	40

Находим среднюю наработку до первого отказа $T_{ср}$.

Учитывая, что в данном случае число инревалов m в статистическом ряду и общее количество объектов наблюдений $N_0 = 45,$ имеем:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{m} n_i \cdot t_{cpi}}{N_0}, \qquad (9)$$

где n_i – число отказов в i-м интервале; t_{cpi} – середина интервала; m – число интервалов в статистическом ряду (m=16).

$$T_{cp} = \frac{1 \cdot 2{,}5 + 5 \cdot 7{,}5 + 8 \cdot 12{,}5 + 2 \cdot 17{,}5 + \ldots + 3 \cdot 62{,}5 + 3 \cdot 67{,}5 + 3 \cdot 72{,}5 + 1 \cdot 77{,}5}{45} = 31{,}72.$$

По результатам расчетов строим графики вероятности безотказной работы изделия P(t), частоты отказов $\lambda(t)$ и интенсивности отказов $\mu(t)$ в зависимости от наработки t (см. рисунки 1-3).

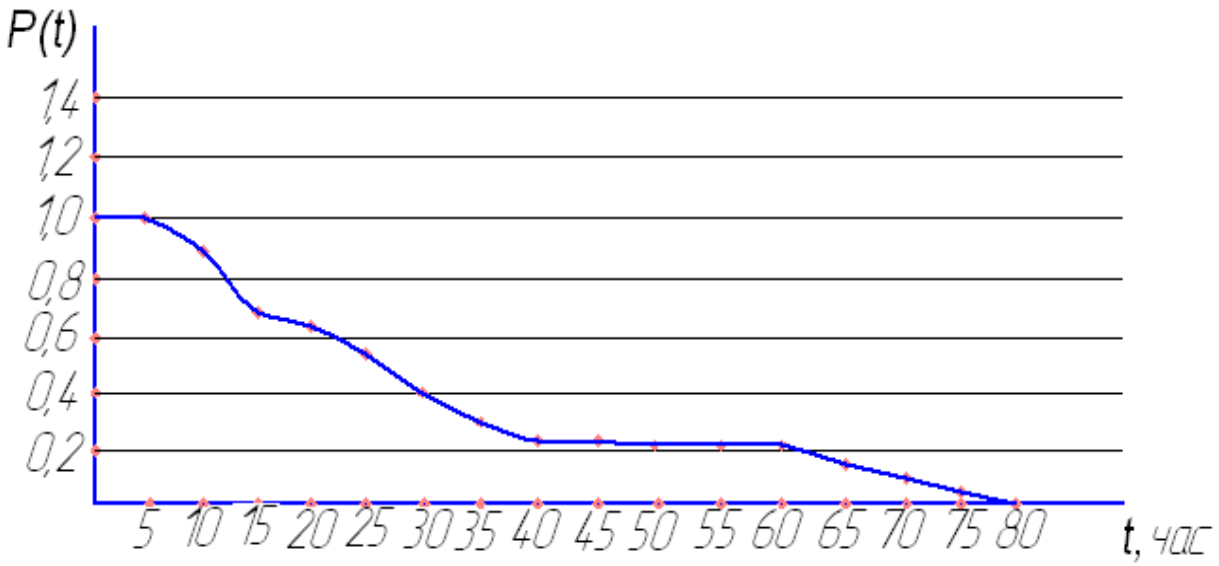


Рисунок 1 – Вероятность безотказной работы изделия
в течение времени *t*

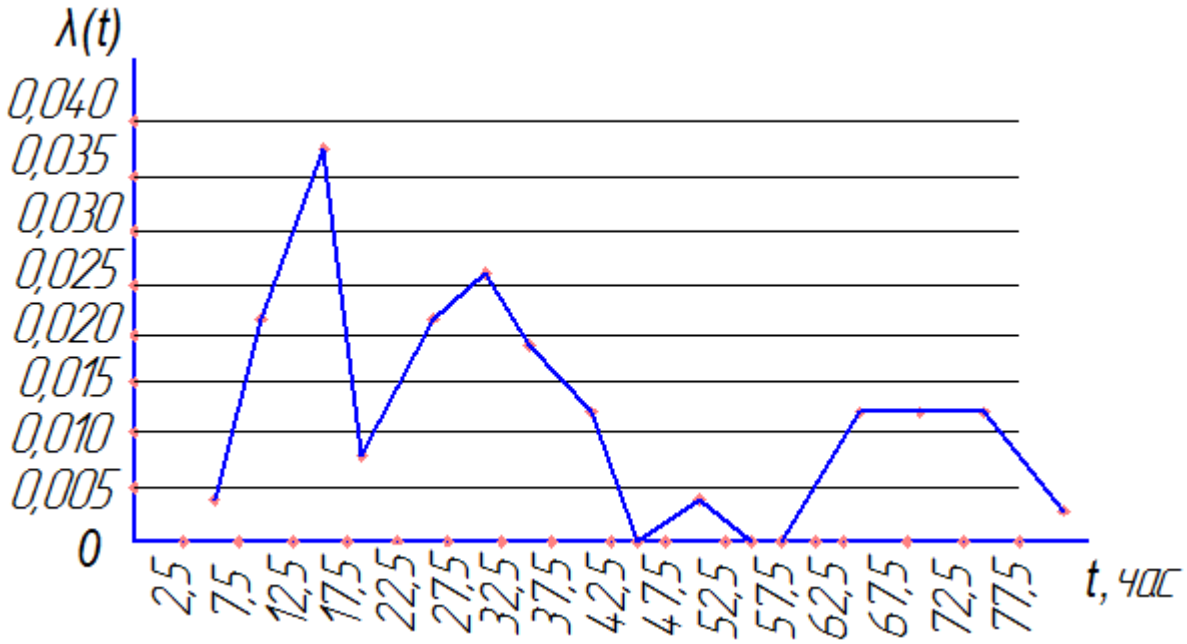


Рисунок 2 – Частота отказов изделия в зависимости
от времени t

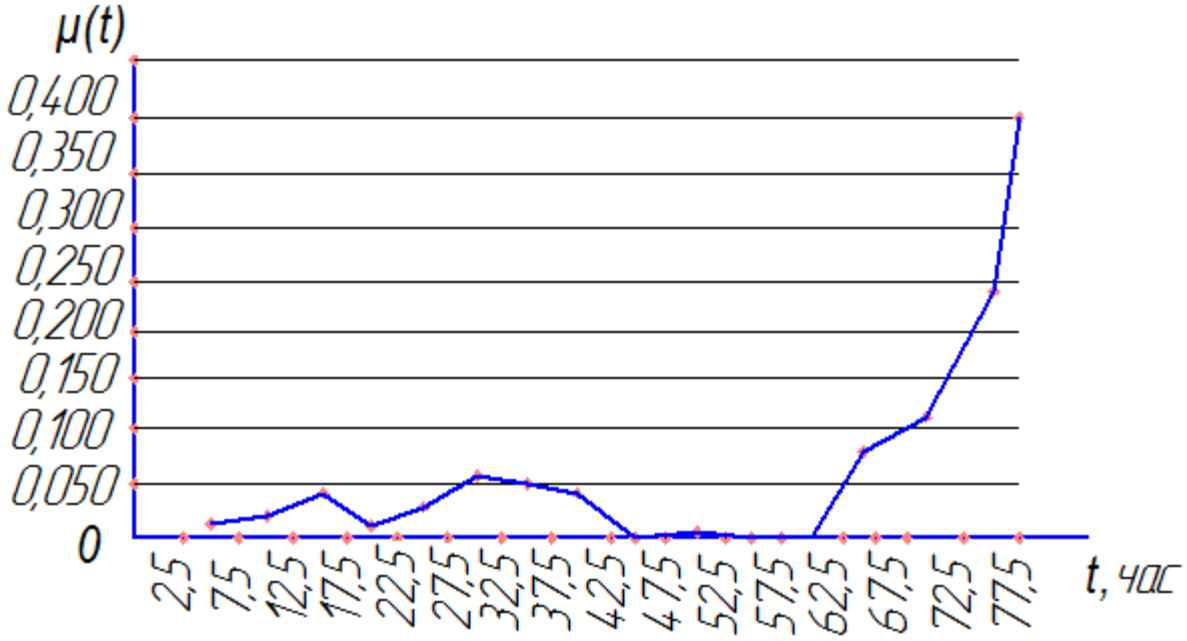


Рисунок 3 – Интенсивность отказов изделия в зависимости от времени t

Вероятность безотказной работы на всем процессе наблюдения уменьшается, а в промежутке наблюдения от 40 до 60 ч0 работы остановилась на уровне 0,22.

В промежутке времени от 2,5 до 12,5 ч работы частота отказов увеличивалась и достигла $36 \cdot 10^{-3}$ ч. В промежутке от 12,5 до 17,5 ч частота отказов уменьшилась до $9 \cdot 10^{-3}$ ч. В промежутке от 17,5 до 27,5 ч частота отказов увеличилась до $27 \cdot 10^{-3}$ ч. В промежутке от 27,5 до 42,5 ч падает до нуля. В промежутке от 42,5 до 57,5 ч частота отказов не превышает $5 \cdot 10^{-3}$ ч и после 47,5 ч работы падает до нуля. В промежутке от 57,5 до 62,5 ч работы частота отказов увеличилась до $13 \cdot 10^{-3}$ ч и держалась до 72,5 ч работы наблюдений. В конце испытания частота отказов упала до $4 \cdot 10^{-3}$ч.

В процессе наблюдения от 2,5 до 57,5 ч интенсивность отказов была в пределах от 0 до $5{,}71 \cdot 10^{-2}$ ч. После 57,5 ч работы наблюдений интенсивность отказов резко увеличилась и в конце наблюдения достигла 0,4 ч.

Варианты заданий для задачи №4 (обязательное)

Дti,ч	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)	*n*(*Дti*)
0-5	1	0	2	1	0	1	2	0	4	1	0	3	1	0	2
5-10	2	3	3	3	2	3	4	1	5	2	2	4	3	2	0
10-15	2	4	5	3	2	3	5	2	6	3	3	5	4	3	3
15-20	3	4	6	4	4	4	5	4	7	4	4	6	6	4	3
20-25	4	5	5	5	5	6	6	5	5	5	6	7	7	0	5
25-30	5	7	4	7	7	8	8	6	4	6	5	5	7	5	6
30-35	4	6	3	6	7	7	5	4	3	5	3	4	4	4	4
35-40	3	3	3	5	5	5	4	3	2	4	2	3	3	3	0
40-45	1	2	1	3	3	4	2	2	1	3	1	2	2	2	2
45-50	0	1	0	1	1	2	1	1	0	1	0	1	1	1	1

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Укажите номер правильного ответа:

1. Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени называют:

1) долговечностью;
2) сохраняемостью;
3) ремонтопригодностью;
4) работоспособностью;
5) безотказностью.

2. Средний ресурс является единичным показателем для оценки:

1) безотказности;
2) ремонтопригодности;
3) долговечности;
4) работоспособности.

3. Вероятность безотказной работы является показателем:

1) работоспособности;
2) исправности;
3) долговечности;
4) безотказности;
5) сохраняемости.

4. Среднее время восстановления работоспособного состояния является единичным показателем:

1) долговечности;
2) ремонтопригодности;
3) сохраняемости;
4) безотказности.

5. Вероятность того, что в пределах заданной наработки не возникает отказ объекта, называют:

1) интенсивностью отказов;

2) параметром потока отказов;
3) средней наработкой до отказа;
4) средней наработкой на отказ;
5) вероятностью безотказной работы.

6. Когда осуществляется сбор информации о надежности машин?

1. В процессе конструирования.
2. В процессе изготовления.
3. В процессе испытаний.
4. В процессе использования по назначению.

7. Если коэффициент вариации равен 0,36, то выбираем следующий теоретический закон распределения случайной величины:

1) закон Гаусса (нормальный закон распределения);
2) закон Вейбулла.

8. Для чего используют критерий Пирсона при обработке опытной информации о надежности машин?

1. Для выбора теоретического закона распределения.
2. Для определения доверительного интервала.
3. Для определения степени совпадения опытного и теоретического распределений.
4. Для оценки точности полученных данных.

9. При каком значении критерия Пирсона теоретическое распределение случайной величины соответствует опытному распределению?

1. От 5 до 100%.
2. От 10 до 100%.
3. От 20 до 80%.
4. От 10 до 80%.

10. Укажите основную причину усталостного изнашивания металлических деталей машин:

1) переменное термическое воздействие;
2) старение металла;
3) накапливание усталостных напряжений в структуре металла.

11. Выберите правильно вид изнашивания, порождаемый наличием абразивных частиц в топливе, воздухе и выхлопных газах:

1) водородное;
2) усталостное;
3) гидро-газоабразивное;
4) кавитационное;
5) абразивное.

12. Вибрация одной детали сопряжения относительно другой порождает следующий вид изнашивания:

1) кавитационное;
2) водородное;
3) изнашивание при фреттинг-процессе;
4) абразивное.

13. Укажите правильно причину электроэрозионного изнашивания определенных групп деталей машин:

1) прохождение электротока по поверхности детали;
2) появление электрических разрядов на поверхности детали при прохождении электротока;
3) перепады напряжения при прохождении электротока по поверхности детали.

14. Укажите причины кавитационного изнашивания деталей машин:

1) лопание пузырьков газа вблизи поверхности детали;
2) лопание пузырьков газа внутри материала детали;
3) попадание твердых частиц в зону трения.

15. Укажите причины водородного изнашивания деталей

машин:

1) взрыв водорода на поверхности детали;

2) расширение поглощенного металлом водорода при перепаде давления и температуры;

3) химическое соединение водорода с металлом детали.

16. К какому виду изнашивания приводит воздействие на деталь переменных динамических нагрузок?

1. Абразивное.
2. Изнашивание при фреттинг-процессе.
3. Усталостное.

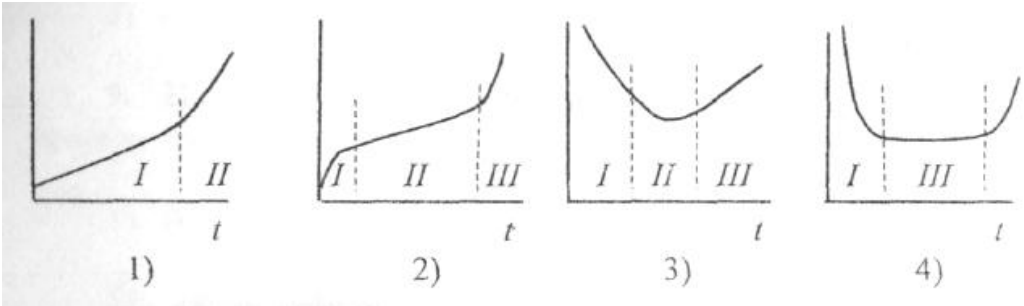
17. Для чего используется микрометраж?

1. Для изучения характера и закономерностей работы деталей.
2. Для изучения степени и закономерностей изнашивания деталей.
3. Для определения характера трения рабочих поверхностей деталей.

18. Для чего используется профилографирование рабочей поверхности детали в процессе испытаний на надежность?

1. Для определения температуры поверхности.
2. Для определения шероховатости поверхности.
3. Для определения величины износа поверхности.

19. Характер износа деталей машин имеет вид:



20. Какая коррозия наиболее агрессивна?

1. Химическая.

2. Электрохимическая.

21. Когда наступает предельное состояние технического объекта?

1. При предельном износе всех его составляющих.
2. При исчерпании установленного ресурса основных агрегатов.
3. Тогда, когда невозможны дальнейшая эксплуатация объекта, а также восстановление его работоспособного состояния по ряду причин.

22. Укажите основную группу критериев, по которой оценивается предельное состояние рабочих органов сельскохозяйственных машин:

1) экономические;
2) технические;
3) качественные.

23. Исправным состоянием технического объекта является:

1) состояние, при котором он может выполнять свои функции;
2) состояние, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической документации;
3) работоспособное состояние.

24. Предельное состояние машины или машинно-тракторного агрегата устанавливается с помощью:

1) технических критериев;
2) экономических критериев;
3) качественных критериев.

25. Основной вид испытаний машин на надежность:

1) стендовые;
2) полигонные;
3) испытания в производственных условиях.

26. В процессе каких испытаний определяют показатели

надежности машин?

1. Контрольные.
2. Исследовательские.

27. К какой группе мероприятий по повышению надежности относится выбор долговечных материалов?

1. Конструктивные.
2. Технологические.
3. Эксплуатационные.
4. Ремонтные.

28. Балансировка деталей машин после ремонта и восстановления относится к следующей группе мероприятий по повышению надежности:

1) эксплуатационные;
2) ремонтные;
3) технологические;
4) конструктивные.

29. Обеспечение достаточной жесткости базовых деталей машин относится к следующим мероприятиям по повышению надежности:

1) технологические;
2) ремонтные;
3) конструктивные;
4) эксплуатационные.

30. Достижение высоких геометрических характеристик поверхности деталей относится к следующей группе мероприятий по повышению надежности?

1. Технологические.
2. Конструктивные.
3. Ремонтные.
4. Эксплуатационные.

31. К какой группе мероприятий по повышению надежности относится обеспечение хороших условий смазывания трущихся поверхностей деталей?

1. Конструктивные.
2. Технологические.
3. Эксплуатационные.
4. Ремонтные.

32. Обеспечение нормального режима работы машин относится к следующей группе мероприятий по повышению надежности:

1) конструкторские;
2) технологические;
3) эксплуатационные;
4) ремонтные.

33. Качество машин – это:

1) высокая надежность;
2) приспособленность к изготовлению;
3) совокупность свойств, характеризующая пригодность удовлетворять определенные потребности;
4) экономичность.

34. В чем отличие математического моделирования процесса эксплуатации технических объектов от экспериментальных исследований?

1. Меньшие затраты времени и ресурсов.
2. Большие временные затраты.
3. Более емкое потребление ресурсов.

35. Техногенный риск системы – это:

1) вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации технических систем;
2) показатель оного из свойств надежности технических систем.

Дополните:

1. Дополните перечень основных факторов, отвечающих за высокий уровень надежности:
1) конструктивный фактор;

2) технологический фактор;
3) _____

2. Безотказность – это непрерывная работоспособность в течение некоторой _____

3. Долговечность – это свойство объекта сохранять при установленной системе ТО и ремонта работоспособность до наступления
_____

4. Сохраняемость – это свойство технического объекта сохранять показатели долговечности, безотказности и ремонтопригодности в процессе_____

5. Календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния называется _____
_____

6. Свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения ТО и ремонтов, называется_____
_____

7. Свойство технического объекта сохранять показатели ремонтопригодности, долговечности и безотказности в течение и после срока хранения называется _____

8. Свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния называют_____
_____

9. Свойство объекта сохранять исправное и работоспособное состояние во время и после хранения и транспортирования
называется_____
_____

10. Суммарная наработка объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта до перехода в предельное состояние называется техническим _____

11. Назначенный ресурс является единичным показателем такого важнейшего свойства надежности, как_____ _____

12. Формула для расчета коэффициента готовности_____ _____

13. Дополните формулу для расчета средних значений показателей надежности при наличии статистического ряда

$$\bar{t} = \sum_{1}^{n} t_{ic} \text{ .....}$$

14. Дополните формулу для расчета среднеквадратического отклонения при наличии статистического ряда

$$\sigma = \sqrt{\sum_{1}^{n} (t_k - \bar{t})^2} \text{.....}$$

15. Дополните формулу для расчета коэффициента вариации

$$\nu = \frac{\sigma}{\text{.....}}$$

16. Изнашивание рабочих поверхностей деталей машин в результате попадания твердых частиц в зону трения называется _____

17. Количество железа в смазке определяется с целью изучения_____ ___

18. Электрохимическая коррозия происходит при наличии в окружающей деталь среде водных растворов_____ _____

19. Событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта, называется_____

_____

20. Дополните формулу по расчету силы трения, согласно молекулярной теории трения

$$F = \mu S(Po + ...)$$

21. Дополните формулу для определения силы трения, согласно гидродинамической теории трения

$$F = \frac{\eta v S}{.....}$$

22. Дополните формулу для определения силы трения, согласно механической теории трения

$$F = A + \mu.....$$

23. Состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо, называется

_____

24. Дополните формулу для расчета минимального значения зазора, обеспечивающего условия жидкостного трения

$$\eta_{\min} = \frac{d^2 n \eta}{13{,}36KS.....}$$

25. Дополните формулу для расчета наивыгоднейшего зазора в сопряжении, когда наблюдается наименьшее трение в слое смазки

$$Sнаив = 0{,}467 d \sqrt{\frac{n\eta}{.....}}$$

26. Дополните формулу для расчета предельного зазора в сопряжении вал-подшипник скольжения

$$Snp = (2{,}0....4{,}5).....$$

27. Дополните формулу для нахождения предельного

искажения геометрической формы деталей в сопряжении вал-подшипник скольжения

$$Y = \frac{0{,}5S}{2{,}5 - .....}$$

28. Какая составляющая отсутствует в формуле для расчета срока службы сопряжения типа «вал-подшипник скольжения»

$$T = t_1 + \frac{S\max.д - Sнач - i_{пр}}{.....}$$

29. Дополните формулу для расчета скорости изнашивания детали типа «вал»

$$w_д = \frac{.....}{Низм 10^{-3}}$$

30. Дополните формулу для расчета остаточного ресурса детали

$$Тд.о = \frac{Ипр - .....}{w_д}$$

31. Дополните формулу для расчета полного ресурса детали

$$Тд.п = \frac{ТдрИпр}{Ипр - .....}$$

32. Дополните формулу для расчета средней скорости изнашивания сопряжения типа «вал-подшипник скольжения»

$$w_д = \frac{Sизм - Sн.\max}{10^{-3}.....}$$

33. Дополните формулу для расчета остаточного ресурса сопряжения

$$Тс.о = \frac{Snn - Sииз}{.....}$$

34. Дополните формулу для расчета средней наработки на отказ (приближенный метод)

$$\overline{Ho} = \frac{\sum_{1}^{N} Hi/m}{\text{.....}}$$

35. Дополните формулу для расчета средней наработки на отказ (точный метод)

$$\overline{Ho} = t_c - \frac{M_1\text{.....}}{\sum m}$$

36. Своевременные и качественные ТО и ремонт машин относятся к данной группе мероприятий по повышению надежности_____ _____

37. Что такое резервирование в области надежности машин? _____

38. Достижение высоких геометрических характеристик качества поверхности деталей относится к_____ _____мероприятиям по повышению надежности.

39. Входной контроль – это контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику и предназначаемой для использования при _____ или эксплуатации продукции.

40. Операционный контроль – это контроль продукции или процесса во время выполнения или после _____ технологической операции.

41. Приемочный контроль – это контроль продукции, по результатам которого принимаются решение о ее _____ к использованию.

42. Инспекционный контроль – это контроль, проводимый специально уполномоченными лицами с целью проверки эффективности ранее выполненного _____

43. Сплошной контроль – контроль каждой единицы_____ _____ в партии.

44. Выборочный контроль – контроль, при котором качество партии изделий оценивают по результатам проверки одной или нескольких _____

45. Летучий контроль – контроль, проводимый в _____ время.

46. Непрерывный контроль – контроль, при котором информация о контролируемых параметрах поступает_____ _____

47. Периодический контроль – контроль, при котором информация о контролируемых параметрах поступает через _____ интервалы времени.

Укажите номера всех правильных ответов:

1. Укажите правильно основные свойства надежности машин:

1) работоспособность;
2) долговечность;
3) износостойкость;
4) ремонтопригодность;
5) безотказность;
6) сохраняемость.

2. Ремонтопригодность – это свойство машины, предусматривающее:

1) проведение ремонта при необходимости;
2) приспособленность к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов;
3) обязательный регламентный ремонт;
4) приспособленность к устранению последствий отказов путем проведения ремонтов и ТО.

3. Укажите показатели безотказности:

1) средний моторесурс;
2) средняя наработка до первого отказа;
3) средний срок службы;
4) назначенный моторесурс;
5) средняя наработка на отказ.

4. Какие из перечисленных показателей надежности относятся к единичным?

1. Средняя наработка до отказа.
2. Средний ресурс.
3. Коэффициент готовности.
4. Коэффициент оперативной готовности.
5. Средняя наработка на отказ.

5. Укажите правильно комплексные показатели надежности:

1) коэффициент готовности;
2) средний ресурс;

3) коэффициент технического использования;
4) гамма-процентный срок службы.

6. В задачи системы сбора и обработки информации о надежности машин входит:

1) определение и оценка показателей надежности;
2) обнаружение конструктивных и технологических недостатков изделий;
3) выявление деталей и сборочных единиц, ограничивающих надежность;
4) определение закономерностей возникновения отказов;
5) установление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность;
6) определение эффективности мероприятий, направленных на повышение надежности.

7. Укажите правильные виды изнашивания деталей, согласно классификации:

1) усталостное;
2) абразивное;
3) ресурсное;
4) окислительное;
5) термическое.

8. Укажите правильно все последствия воздействия на деталь физического поля:

1) пластическое деформирование;
2) хрупкое и вязкое разрушение;
3) усталостное разрушение;
4) тепловое разрушение;
5) оплавление.

9. Укажите правильные названия отказов машин, согласно классификации:

1) внезапный;
2) конструктивный;
3) неопределенный;
4) постепенный;
5) перемежающийся.

10. Отказ объекта, возникший в результате отказа другого объекта, называется:

1) внезапный;
2) постепенный;
3) зависимый;
4) производственный.

11. Укажите правильно последствия морального износа машин:

1) предельное состояние машин;
2) увеличение стоимости действующей техники;
3) уменьшение стоимости действующей техники.

12. Укажите правильно технические критерии определения предельного состояния деталей машин:

1) ухудшение качества выполняемой работы;
2) снижение производительности;
3) предельное значение размера рабочей поверхности детали;
4) предельное искажение геометрической формы рабочей поверхности детали;
5) повышение затрат.

13. Ускоренные испытания на надежность – это:

1) сокращенные по времени;
2) уплотненные (по времени);
3) ужесточенные (по нагружению).

14. Укажите правильные группы показателей качества изделий:

1) показатели надежности;
2) показатели пригодности;
3) показатели назначения;
4) показатели изготовления;
5) показатели технологичности.

15. Назовите все виды контроля качества по стадиям технологического процесса:

1) входной;
2) операционный;
3) приемочный;
4) инспекционный.

16. Назовите все виды контроля качества по степени охвата:

1) сплошной;
2) выборочный;
3) одиночный.

17. Назовите все виды контроля качества по времени проведения:

1) летучий;
2) непрерывный;
3) периодический;
4) постоянный.

18. Назовите правильно основные факторы для выбора теоретического закона распределения случайной величины:

1) физическая сущность случайной величины с учетом области применения того или иного закона распределения;
2) внешний вид гистограммы;
3) величина коэффициента вариации.

19. Основными показателями надежности восстанавливаемых систем являются:

1) наработка на отказ;
2) функция готовности;
3) коэффициент готовности;
4) время восстановления;
5) срок сохраняемости.

20. Для повышения надежности техники наиболее часто применяются следующие основные виды резервирования:

1) с постоянно включенным резервом;
2) по методу замещения отказавшего элемента;
3) по методу совмещения отказавшего элемента;
4) с параллельно включенным резервом.

21. Какие основные методы используются в практике контроля надежности?

1. Метод однократной выборки (одиночный контроль).
2. Последовательный метод.
3. Параллельный метод.
4. Метод случайной выборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как известно, качество машин заключается в приспособленности выполнять свои основные функции в соответствии с назначением. Надежность машин и ее показатели являются одними из основных критериев высокого качества.

Наука о надежности машин изучает причины и закономерности нарушения надежности и работоспособности машин, а также методы повышения надежности. Понятие надежности комплексное и включает группу показателей: безотказность, долговечность, ремонтопригодность, сохраняемость.

Материалы, приведенные в учебном пособии, позволяют на достаточно высоком уровне изучить закономерности изменения основных свойств надежности сельскохозяйственной техники. Практическая часть учебного пособия дает возможность приобрести необходимые навыки для определения основных оценочных показателей надежности и качества машин по данным испытаний на надежность.

Раздел учебного пособия, посвященный современным методам повышения надежности технических объектов, подробно рассматривает все основные приемы, способы и методики в области увеличения значений различных показателей надежности и работоспособности сельскохозяйственной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко, И.Н. Основы надежности машин [Текст]: в 2 ч. Ч. I / И.Н. Кравченко, В.А. Зорин, Е.А. Пучин. – М.: Изд-во ВТУ при Федеральном агентстве специального строительства, 2006. – 224 с.
2. Кравченко, И.Н. Основы надежности машин [Текст]: в 2 ч. Ч. II / И.Н. Кравченко, В.А. Зорин, Е.А. Пучин. – М.: Изд-во ВТУ при Федеральном агентстве специального строительства, 2006. – 260 с.
3. Надежность и ремонт машин [Текст] / В.В. Курчаткин, Н.Ф. Тельнов, К.А. Ачкасов [и др.]; под ред. В.В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776 с.
4. Острейковский, В.А. Теория надежности [Текст]: учеб. для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
5. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Черноиванов, В.В. Бледных, А.Э. Северный [и др.]; под ред. В.И. Черноиванова. – М., Челябинск: Изд-во ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. – 992 с.
6. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем [Текст]: учеб. для студентов высших учеб. заведений / В.Ю. Шишмарев. – М.: Академия, 2010. – 304 с.
7. Труханов, В.М. Надежность технических систем [Текст]: учеб. для вузов / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 2003. – 320 с.
8. Половко, А.М. Основы теории надежности [Текст]: практикум / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
9. Ермолов, Е.С. Основы надежности сельскохозяйственной техники [Текст] / Е.С. Ермолов, В.М. Кряжков, В.Е. Черкун. – М.: Колос, 1982. – 143 с.
10. ГОСТ 23.002-78. Обеспечение износостойкости изделий. Трение изнашивание и смазка. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
11. ГОСТ 27.002-83. Надежность в технике. Термины и

определения. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
12. ОСТ 70.2.8.-82. Испытание сельскохозяйственной техники. Надежность. Сбор и обработка информации. – М.: Госкомсельхозтехника СССР, 1983.
13. ГОСТ 17510-91. Надёжность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 5 с.
14. ГОСТ 17510-72. Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. – М.: Изд-во стандартов, 1973.
15. ГОСТ 27674-88. Обеспечение износостойкости изделий. Трение изнашивание и смазка. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989.

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

ЖУРАВЛЁВ Сергей Юрьевич

Редактор *В.А. Сорокина*

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.I I . 000381.09.03 от 25.09.2003 г.
Подписано в печать 28.11.2013 г. Формат 60x84/16. Бумага тип №1.
Печать – ризограф. Усл. печ. л. 20,75. Тираж 110 экз. Заказ № 888
Издательство Красноярского государтсвенного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117