

УЧЕБНИК

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. В. ЧЕПУРИН
Е. Л. ЧЕПУРИНА
Д. Л. КУШНАРЕВА
Д. А. ПУПКОВА
Л. А. ГРИНЧЕНКО

ISBN 978-5-9546-0134-3



9 785954 601343 >

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



**А. В. ЧЕПУРИН, Е. Л. ЧЕПУРИНА, Д. Л. КУШНАРЕВА,
Д. А. ПУПКОВА, Л. А. ГРИНЧЕНКО**

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УЧЕБНИК

Москва
ООО «УМЦ «Триада»
2026

УДК 62-192
ББК 34.414
Н 172

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий отделом технического сервиса
ФГНУ «Росинформагротех» **И. Г. Голубев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры МТ13 «Технологии обработки материалов» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)»
В. М. Юдин

Чепурин А. В., Чепурина Е. Л., Кушнарера Д. Л., Пупкова Д. А., Гринченко Л. А.

Н 172 Надежность технических систем: Учебник / А. В. Чепурин, Е. Л. Чепурина, Д. Л. Кушнарера, Д. А. Пупкова, Л. А. Гринченко / РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева. – М. : ООО «УМЦ «Триада», 2026. – 221 с.

ISBN 978-5-9546-0134-3

В учебнике изложены основные сведения о теории надежности на основе теории вероятности и математической статистики. Особое внимание уделено методам расчета показателей надежности сложных систем, испытаниям машин на надежность, а также методам повышения надежности технических систем. Инженерные расчеты показателей надежности элементов технических систем иллюстрированы многочисленными примерами. Для практических занятий приведены задачи по надежности машин.

Учебник предназначен для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки: 27.04.01 «Стандартизация и метрология», 27.03.02 «Управление качеством», 35.04.06 «Агроинженерия», 23.03.01 «Технология транспортных процессов» и 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 20.03.01 «Техносферная безопасность».

Может быть интересен магистрам и аспирантам, научным и инженерно-техническим работникам, занимающимся вопросами работоспособности машин и оборудования и специализирующимся в области надежности.

ISBN 978-5-9546-0134-3

УДК 62-192
ББК 34.414

© Коллектив авторов, 2026
© ООО «УМЦ «Триада», 2026

ВВЕДЕНИЕ

Сложность современных технических систем, многообразие режимов работы, повышение нагрузок и скоростей движения агрегатов требуют новых подходов к решению проблемы их надежности. Принципиальные конструктивные решения не могут быть эффективными без должного обеспечения надежности работы машины, ее агрегатов, соединений и деталей в реальных условиях эксплуатации.

Долговечность деталей машин зависит от выполняемых ими функций, широкого диапазона действующих нагрузок и скоростных режимов, разнообразия видов трения, используемых материалов, наличия отклонений в их свойствах, различия в допусках на размеры, качества обработки поверхностей, взаимного расположения деталей, влияния условий эксплуатации. Вот почему за срок службы машины, определяемый долговечностью базовых деталей, значительное число деталей требует замены или восстановления.

Основоположниками гидродинамической теории трения и смазки были академик С. А. Чаплыгин, профессора Н. П. Петров, Н. Е. Жуковский, Н. И. Мерцалов, труды которых стали основой для разработки процессов по снижению изнашивания и увеличению долговечности машин.

Большой вклад в науку о трении и изнашивании внесли профессора В. Д. Кузнецов, Б. И. Костецкий, И. В. Крагельский, М. М. Хрущов, Д. Н. Гаркунов, М. М. Тененбаум и др.

По мере увеличения наработки машин под действием нагрузок и окружающей среды искажаются формы рабочих поверхностей и изменяются размеры деталей; увеличиваются зазоры в подвижных и снижаются натяги в неподвижных соединениях; нарушается взаимное расположение деталей, что приводит к нарушению зацепления зубчатых передач, возникновению дополнительных нагрузок и вибраций; снижаются упругие и эластичные свойства, намагниченность; откладываются нагар и накипь; появляются усталостные и коррозионные разрушения и т. д. В результате перечисленных процессов отдельные детали и соединения при различных наработках теряют работоспособность.

К настоящему времени накоплен значительный опыт в области практического применения теории надежности. Это в свою очередь привело к возникновению новых принципов и подходов, используемых при проектировании, производстве и эксплуатации машин, а также новых понятий, определений и методов исследований. При этом основной

задачей теории надежности является изучение закономерностей возникновения отказов и неисправностей объекта и на базе результатов исследований разработка мероприятий, направленных на обеспечение выполнения объектом заданных функций с минимальными затратами. Следует также отметить, что за последние годы значительно усложнился математический аппарат теории надежности. Кроме того, разработаны сравнительно новые методы и существенно расширились области их применения. Поэтому для правильного понимания проблем обеспечения надежности машин уже недостаточно знать только основы классической теории надежности.

В настоящее время наука о надежности машин динамично развивается и включает целый ряд направлений и разделов. Применительно к сельскохозяйственным машинам и оборудованию она решает следующие основные задачи:

- прогнозирование надежности машин на стадии проектирования для выбора рациональных конструктивно-технологических решений, обеспечивающих требуемый уровень надежности при минимальных производственных и эксплуатационных затратах;
- обоснование оптимальной стратегии технической эксплуатации, периодичности технических обслуживаний и ремонтов техники;
- разработку теории и методов диагностирования машин и технических систем с целью предотвращения внезапных отказов, сокращения простоев и расходов на восстановление, обеспечение безопасности работы;
- обоснование необходимого объема парка машин, резерва запасных частей и материалов, а также стратегии использования техники, обеспечивающей требуемую эффективность ее функционирования.

Решать эти задачи призваны, прежде всего, инженерные работники, знакомые с теорией надежности и способные применить свои знания при проектировании, производстве и эксплуатации машин. При этом современному инженеру-специалисту в области надежности приходится иметь дело, как со сложными техническими системами, так и с отдельными конкретными элементами этих систем, что естественно требует специальных знаний по различным вопросам.

Настоящий учебник призван ознакомить широкий круг читателей с решением вопросов обеспечения планируемого уровня работоспособности, повышения надежности и других качественных показателей машин при проектировании и эксплуатации с учетом их специфики. При-

чем вопросы обеспечения надежности при производстве машин являются общими для машин различного назначения и в достаточной мере отражены в технической литературе.

Пользуясь приведенными в учебнике рекомендациями и нормативами, специалист может не только оценить качество новой и отремонтированной техники, но и повысить ее эксплуатационную надежность.

Книга предназначена главным образом для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 27.04.01 «Стандартизация и метрология», 27.03.02 «Управление качеством», 35.04.06 «Агроинженерия», 23.03.01 «Технология транспортных процессов» и 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 20.03.01 «Техносферная безопасность» и может быть использована в качестве учебника при изучении дисциплин «Надежность технических систем обеспечения безопасности на предприятиях АПК», «Надежность технических систем» и «Основы теории надежности», а также инженерно-технических работников сельскохозяйственного производства.

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

1.1. Общие принципы обеспечения надежности машин

В настоящее время в связи с увеличением сложности машин, многообразием и ответственностью решаемых ими задач проблема обеспечения надежности этих машин становится все более актуальной. Успешное решение данной проблемы зависит от качества организационного, технического, информационного и методологического обеспечения [1, 2].

Организационное обеспечение включает: порядок планирования и реализации работ по обеспечению надежности, организацию служб надежности, экономические, административные и правовые отношения между заказчиком, разработчиком и изготовителем продукции.

Техническое обеспечение определяется оснащением отраслей вычислительной техникой, экспериментальной и производственной базой, уровнем технологии и метрологии.

Информационное обеспечение – это средства и способы сбора, накопления, обработки и использования данных о процессах разработки и эксплуатации систем, результатов анализа отказов и дефектов, данных об изменении документации, нарушении стабильности производства, срывах сроков и других факторах отклонений от запланированного хода разработки и применения техники, а также данных по принятым мерам предупреждения, контроля и защиты от последствий этих отклонений.

Методологическое обеспечение включает теоретическую базу и инженерные методы анализа надежности технических систем на различных стадиях разработки, а также методы и алгоритмы, используемые при реализации и анализе результатов внедрения программ обеспечения надежности.

Обеспечение надежности, как одна из основных задач процесса разработки и применения сложных технических систем, реализуется в рамках организационной структуры, существующей в отрасли. Поэтому одно из направлений в обеспечении надежности заключается в совершенствовании самой организационной структуры, а также в разработке и реализации дополнительных мероприятий, стимулирующих повышение надежности.

Теоретический анализ явлений, технологических процессов и функционирования машин и конструкций основан на выборе определенных моделей или расчетных схем. При этом выделяют существенные факторы и отбрасывают несущественные, второстепенные. Возможны два подхода к анализу: детерминистический и стохастический (вероятностный, статистический). При детерминистическом подходе все факторы, влияющие на поведение модели, т. е. параметры модели и параметры окружающей среды, начальные условия и т. п., считают вполне определенными, детерминированными. Решение корректно поставленной детерминистической задачи единственно и, следовательно, предсказывает поведение реальной системы однозначным образом. Однако выводы, основанные на детерминистических моделях, могут расходиться с результатами опытных наблюдений. Одна из причин состоит в том, что на поведение реальных систем влияет большое количество разнообразных, слабо контролируемых и сложным образом взаимодействующих факторов. Поэтому поведение реальных систем в той или иной мере носит неоднозначный, случайный характер. В отличие от детерминистического подхода, стохастический подход к анализу явлений учитывает случайные факторы и дает предсказания, содержащие вероятностные оценки.

Методы описания стохастических моделей и построения на их основе вероятностных выводов дает математическая дисциплина – теория вероятностей. В основе теории вероятностей лежит понятие случайного события. Будем называть событием качественный или количественный результат опыта, осуществляемого при вполне определенных условиях. Событие называют достоверным, если оно неизбежно происходит при данном комплексе условий, и невозможным, если оно при этих условиях заведомо произойти не может. Событие, которое при данном комплексе условий может произойти, а может и не произойти, называют случайным. Изменчивость исхода события означает, что за пределами данного комплекса условий есть факторы, которые мы либо сознательно игнорируем, либо о которых не имеем достаточной информации. Примером такого события может служить отказ машины или одного из ее элементов на заданном отрезке времени. Поскольку обычно нет полных сведений ни об условиях эксплуатации машины, ни о свойствах ее элементов, то отказ обычно трактуют как случайное событие.

В теории надежности сосуществуют два направления, родственные по идеологии и общей системе понятий, но отличающихся по подходу.

Первое направление – системная, статистическая или математическая теория надежности, второе направление можно условно назвать физической теорией надежности. Объектом системной (статистической, математической) теории надежности служат системы из элементов, взаимодействующих между собой в смысле сохранения работоспособности по логическим схемам: графам, деревьям отказов и т. п.

Исходную информацию в системной теории надежности, как правило, образуют показатели надежности элементов, определяемые путем статистической обработки результатов испытаний и (или) эксплуатационных данных. Задачи системной теории надежности решают в рамках теории вероятностей и математической статистики, т. е. без привлечения физических моделей отказов и тех физических явлений, которые вызывают и сопровождают возникновение отказов.

Истоки физической теории надежности можно найти в ранних работах по статистическому истолкованию коэффициентов запаса при расчете инженерных конструкций. Отличительная черта физической теории надежности состоит в том, что поддержание работоспособности системы и возможности возникновения отказов рассматривают в ней как результат взаимодействия между системой и внешними воздействиями (эксплуатационными нагрузками, условиями среды и т. п.), а также механическими, физическими и химическими процессами, которые происходят в компонентах системы в процессе ее эксплуатации. Наряду со средствами теории вероятностей и математической статистики в физической теории надежности широко используют модели и методы естественных и технических наук.

1.1.1. Стандартизация в области надежности

Методы и процедуры, связанные с обеспечением надежности на всех этапах жизненного цикла объекта, начиная с разработки технического задания, подлежат стандартизации. Основы нормирования и обеспечения надежности регламентируются техническими регламентами, национальными стандартами, а также международными документами рекомендательного характера.

Технические регламенты и стандарты по надежности служат нормативной базой для создания продукции, обладающей необходимым уровнем надежности, регулируют взаимоотношения заинтересованных сторон (заказчиков, разработчиков, изготовителей, поставщиков и по-

требителей) при решении проблемы обеспечения надежности продукции на всех стадиях жизненного цикла. Особенно важна роль технических регламентов применительно к объектам общегосударственного значения (энергетика, связь и другие линии жизнеобеспечения), а также применительно к объектам, отказы которых могут угрожать населению и (или) окружающей среде или могут привести к большому экономическому ущербу.

Методологическое значение стандартов по надежности состоит в том, что они позволяют регламентировать методы решения типовых задач анализа, прогнозирования, оценивания и обеспечения надежности, отвечающие современному научно-техническому уровню. Тем самым стандарты по надежности вносят существенный вклад в общее дело повышения культуры проектирования, изготовления и эксплуатации технических объектов, повышения эффективности производства и качества продукции. Для изделий, которые являются объектами общегосударственного значения, технические регламенты устанавливают количественные требования к показателям надежности, а также к способам контроля надежности на всех этапах жизни изделия.

Нормативно-техническая документация по надежности представляет собой комплекс взаимосвязанных нормативных документов. Образцом таких документов могут служить разработки Международной организации по стандартизации (ИСО) и Международной электротехнической комиссии (МЭК), а также ряда других международных, региональных и национальных организаций общетехнического, межотраслевого и отраслевого характера.

В 1990 году в ходе развития в России работ по стандартизации в связи с новыми экономическими условиями создан технический комитет по стандартизации ТК-119 «Надежность в технике». Проведенные исследования целей и задач стандартизации данного направления и сравнительный анализ национального и международного фонда стандартов по надежности определили следующие основные цели создания национальной системы стандартизации «Надежность в технике» (ССНТ):

1. Нормативное регулирование взаимоотношения и взаимодействия сторон, участвующих в создании и эксплуатации техники, при решении проблемы обеспечения ее надежности, имея в виду, в первую очередь, выполнение требований по безопасности, охране среды обитания, ресурсосбережению;

2. Создание предпосылок по внедрению в практику достижений научно-технического прогресса путем регламентации в стандартах современных методов решения задач надежности как основы для разработки соответствующих правил, методик применяемых при создании и применении конкретных изделий;

3. Установление необходимого уровня надежности изделий, качество которых является объектом государственного управления, ввиду непосредственной связи с обеспечением требований по безопасности и охране среды обитания.

Структура стандартов по надежности, предложенная ТК – 119, представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Структура общетехнических стандартов по надежности (предложенная ТК – 119)

Направления надежности	Предлагаемые аспекты стандартизации
1. Общие вопросы	1.1. Системообразующий стандарт (концепция стандартизации в области надежности). 1.2. Основные понятия. Термины и определения. 1.3. Общие правила классификации отказов и предельных состояний. 1.4. Состав и общие правила задания требований по надежности. 1.5. Экономические аспекты надежности (оценка стоимости жизненного цикла)
2. Организационные вопросы обеспечения надежности	2.1. Основные положения по организационному обеспечению надежности (системы и службы надежности, задачи, организация работ). 2.2. Программы обеспечения надежности (в том числе комплексной экспериментальной отработки, обеспечения ремонтпригодности и др.). 2.3. Сбор, обработка и реализация информации о надежности
3. Физические, технические, технологические аспекты обеспечения надежности	3.1. Методы контроля надежности изделий по параметрам технологического процесса их изготовления. 3.2. Приработка изделий, технологическая тренировка, отбраковка потенциально ненадежных экземпляров. 3.3. Модели отработки изделий на надежность. 3.4. Прогнозирование и оценка остаточного ресурса изделий. 3.5. Контроль правильности применения комплектующих изделий. 3.6. Физические основы форсированных испытаний на надежность. Общие положения

Продолжение таблицы 1.1

4. Расчеты	<p>4.1. Расчеты надежности. Общие требования.</p> <p>4.2. Расчеты безотказности и долговечности невосстанавливаемых изделий.</p> <p>4.3. Расчет безотказности восстанавливаемых изделий.</p> <p>4.4. Расчет ремонтпригодности изделий.</p> <p>4.5. Расчет долговечности восстанавливаемых изделий (включая обоснование назначенных показателей долговечности).</p> <p>4.6. Расчет надежности сложных систем изделий.</p> <p>4.7. Расчет комплектов запасных частей (ЗИП).</p> <p>4.8. Расчет параметров технического обслуживания и ремонта.</p> <p>4.9. Расчет надежности программного обеспечения.</p> <p>4.10. Анализ возможных причин и последствий отказов при проектировании</p>
5. Испытания, оценка, контроль	<p>5.1. Испытания на надежность. Основные положения.</p> <p>5.2. Предварительная обработка статистических данных, характеризующих надежность изделий.</p> <p>5.3. Оценка параметров распределения случайных величин, характеризующих надежность изделий.</p> <p>5.4. Оценка показателей надежности по экспериментальным данным</p>
5. Испытания, оценка, контроль	<p>5.5. Методы и планы испытаний для контроля средней наработки на отказ.</p> <p>5.6. Методы и планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы.</p> <p>5.7. Методы и планы испытаний для контроля коэффициента готовности.</p> <p>5.8. Методы испытаний ремонтпригодности.</p> <p>5.9. Ускоренные испытания на надежность. Основные положения.</p> <p>5.10. Оценка и контроль надежности с учетом априорных статистических данных</p>

Предложено ввести три уровня стандартов: первый – общетехнический (общетехнические регламенты), положения которого распространяются на технику в целом; второй уровень образуют стандарты на укрупненные группы однородной продукции (специальные технические регламенты); стандарты третьего уровня распространяются на группы однородной продукции или изделия конкретного вида.

Государственные стандарты первого уровня образуют систему стандартов «Надежность в технике». Эти стандарты должны быть со-

гласованы с международными стандартами. При этом планируется осуществить максимально возможное соответствие структуре международных стандартов. В частности, предусмотрена возможность введения в действие стандартов МЭК в качестве государственных стандартов.

Стандарты второго и третьего уровней будут разработаны вне системы «Надежность в технике». Эти стандарты должны конкретизировать положения общетехнических стандартов применительно к данной группе изделий, а также содержать конструктивные, технологические и эксплуатационные требования, специфические для данной группы изделий. Стандарты третьего уровня разрабатывают лишь при явно выраженной специфике в организации и методологии обеспечения надежности соответствующих изделий или при необходимости назначения более жестких (по сравнению со стандартами второго уровня) требований по надежности. Такая структура нормативно-технической документации по надежности отражает сложившуюся мировую практику по стандартизации, а именно упрощение иерархии стандартов путем ее сведения к двум уровням: уровню национальных стандартов, гармонизированных с международными и уровню стандартов фирм, ассоциаций и т. д.

В структуре стандартов ССНТ на первом уровне с учетом проблемной ориентации общетехнических стандартов, состояния национальной и международной стандартизации в области надежности, тенденций и перспектив развития выделены пять основных направлений стандартизации: общие вопросы; организация работ по обеспечению надежности; способы обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла; анализ и расчет надежности; испытания, контроль, оценка надежности. Исходя из реально решаемых задач, в практике обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла в стандартах ССНТ выявлен наиболее рациональный состав объектов стандартизации по каждой группе (таблица 1.1).

В группу «Общие вопросы» входят объекты стандартизации, не связанные непосредственно со стадиями жизненного цикла, техникой обеспечения надежности, видами работ и т.п. Сюда относятся: основные принципы стандартизации в области надежности; понятия надежности, термины и определения, положения и модели; общие правила выработки требований по надежности, которые следует предъявлять к изделиям; виды классификаций, принятые в надежности, в том числе основной вид – классификация отказов и предельных состояний.

В группу «Организация работ по обеспечению надежности» входят: общий порядок обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла и организационные структуры; планирование работ и программы обеспечения надежности; управление применением комплектующих изделий (надежностные аспекты); информационное обеспечение надежности; экспертиза проектов.

В третью группу входят: физические, технические, технологические и эксплуатационные аспекты; общие требования и рекомендации по конструктивным и технологическим способам обеспечения надежности; экспериментальная отработка на надежность и моделирование роста надежности; надежно-ориентированные способы контроля и отбраковки потенциально ненадежных экземпляров; назначение и продление срока службы и ресурса; обеспечение (поддержание) надежности в эксплуатации.

Четвертая группа «Анализ и расчет надежности» включает в качестве объектов стандартизации: порядок и общие требования к методам анализа и расчета; методы расчета показателей надежности; учет надежности программного обеспечения; эргономические аспекты надежности; анализ возможных видов последствий и критичности отказов.

В пятой группе «Испытания, контроль и оценка надежности» выделены следующие объекты стандартизации: порядок оценки и контроля надежности; правила проведения и общие требования к методам испытаний; выбор условий и режимов испытаний; предварительная обработка статистических данных о надежности, выявление неоднородностей, и т. п.; оценка показателей надежности по экспериментальным данным; планы контрольных испытаний на надежность; оценка надежности объектов по данным о надежности составных частей; методы сокращения объектов испытаний, включая контроль надежности изделий по состоянию технологического процесса их изготовления.

Новое поколение отечественных стандартов, предлагаемое ТК – 119, в значительной степени приближено к международному уровню, сохраняя в то же время традиции, заложенные в разработанные ранее стандарты, в том числе основополагающие – ГОСТ 27.002 – «Надежность в технике».

1.1.2. Связь диагностики с надежностью

Техническая диагностика представляет теорию, методы и средства обнаружения и поиска дефектов и неисправностей объектов. Применительно к машинам диагностика оказалась достаточно эффективной, позволяя не только выяснить причины неисправностей и плохих качественных показателей, но и оказать существенную помощь при обеспечении надежности на стадиях проектирования и производства машин. При эксплуатации и ремонте машин диагностирование необходимо для улучшения технического обслуживания, прогнозирования ресурса, контроля качества выполнения ремонтных работ и модернизации конструкции. При хранении резервного оборудования с помощью диагностирования проверяется работоспособность, изучаются процессы старения и коррозии деталей (рисунок 1.1).

Связь диагностики с повышением надежности заключается в улучшении таких показателей, как коэффициент готовности, время восстановления работоспособного состояния, остаточный ресурс, наработка на отказ. Правильная организация диагностирования на этапах изготовления вплоть до выходного контроля снижает производственный брак. Далее роль диагностики рассматривается на всех этапах жизненного цикла машин при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Применительно к задачам, решаемым технической диагностикой, на стадии изготовления можно выделить периоды приемки комплектующих изделий и материалов, процесса производства, наладки и сдачи машины. Для стадии эксплуатации типичными являются этапы применения машины по назначению, профилактики (плановой, перед и после применения по назначению), ремонта, транспортирования и хранения.

Требования, которым должна удовлетворять изготовленная или эксплуатируемая машина, определяются нормативно-технической документацией. Машина, удовлетворяющая всем требованиям нормативно-технической документации, является исправной. Для условий эксплуатации практически важным является понятие работоспособного технического состояния машины. Убеждаться в работоспособности машины необходимо при профилактике, после транспортирования и хранения. Для этапа применения по назначению существенным является понятие технического состояния, правильного функционирования машины.

Правильно функционирующей является машина, значения параметров (признаков) которой в текущий момент применения находятся в требуемых пределах.

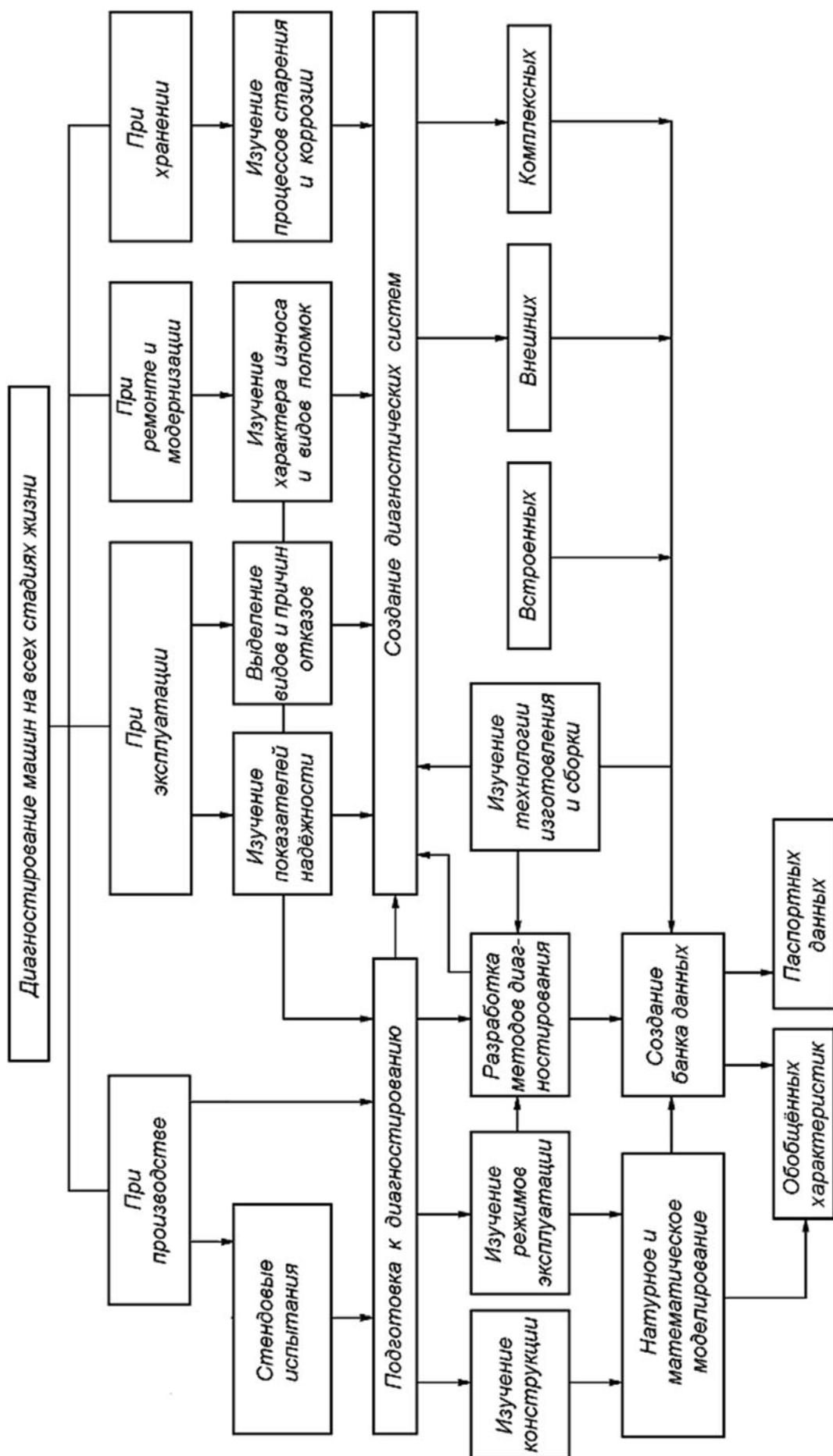


Рисунок 1.1 – Особенности диагностирования машин на всех стадиях жизненного цикла

Таким образом, задачами диагностирования являются: проверки исправности, работоспособности и правильности функционирования машины, а также задачи поиска дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования. Строгая постановка этих задач предполагает, во-первых, прямое или косвенное задание класса возможных (рассматриваемых, заданных, наиболее вероятных) дефектов и, во-вторых, наличие формализованных методов построения алгоритмов диагностирования, реализация которых обеспечивает обнаружение дефектов с требуемой полнотой.

Совокупность принципов, методов и средств поиска и обнаружения дефектов или, иными словами, организации диагностического обеспечения машин при их изготовлении и эксплуатации составляет основу диагностического аспекта надежности. В рамках диагностического аспекта должны решаться задачи определения технического состояния объектов, т. е. организации проверки исправности, работоспособности, правильности, функционирования и поиска дефектов объектов в процессе их производства и эксплуатации.

Диагностическое обеспечение, как и все другие мероприятия по повышению надежности, должно закладываться на стадии проектирования объекта, обеспечиваться на стадии производства и поддерживаться на стадии эксплуатации.

1.2. Основные понятия и определения теории надежности

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

В определении надежности фигурирует термин «*Объект*» – предмет определенного целевого назначения, рассматриваемый в период проектирования, производства, эксплуатации, исследований и испытаний на надежность.

В теории надежности под объектом понимают изделия, технические системы и их элементы, машины, агрегаты, сборочные единицы, детали, аппараты, приборы и т. д.

Изделие – единица промышленной продукции, *элемент* – составная часть изделия, *система* – совокупность совместно действующих

элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций. Понятия «элемент» и «система» могут взаимно трансформироваться в зависимости от поставленной задачи. Например, трактор с точки зрения надежности можно рассматривать как систему, состоящую из отдельных элементов – агрегатов, сборочных единиц, механизмов, деталей и т. д., но трактор, функционирующий в составе агрегата, на который заданы требования по надежности, рассматривают уже как элемент.

Первостепенное значение надежности связано с тем, что ее уровень в значительной степени определяет развитие автоматизации производственных процессов, интенсификации рабочих процессов, экономии материалов и энергии.

Актуальность надежности возрастает в связи со сложностью современных машин и важностью функций, которые они выполняют. Современные технические системы состоят из множества взаимодействующих механизмов, аппаратов и приборов. Отказ хотя бы одного элемента сложной системы приводит к нарушению работы всей системы. При увеличении числа элементов, входящих в систему, при постоянной надежности каждого из них снижается надежность всей системы.

Объект с точки зрения надежности может находиться в одном из следующих состояний: исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном и предельном (рисунок 1.2).

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Неисправное состояние – состояние объекта, при котором он не удовлетворяет хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

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

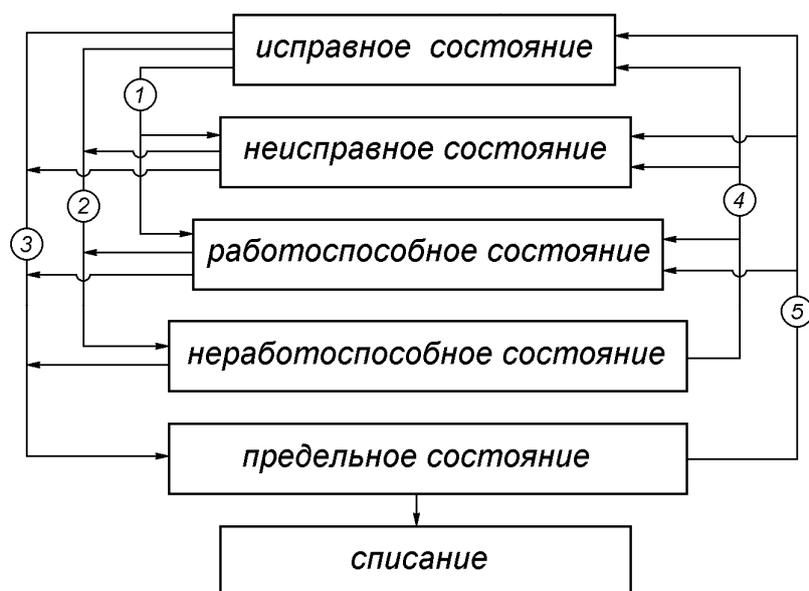


Рисунок 1.2 – Схема основных состояний объекта и событий:
 1 – повреждение; 2 – отказ; 3 – переход объекта в предельное состояние;
 4 – восстановление; 5 – ремонт

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

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

При оценке предельного состояния используются критерии предельного состояния, которые для сельскохозяйственных машин и их составных частей (сборочных единиц, механизмов, агрегатов или узлов) представлены в таблице 1 приложения.

Переход объекта из исправного состояния в неисправное или работоспособное состояние называют *повреждением*.

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

Переход объекта в неработоспособное состояние из исправного, неисправного или работоспособного состояния называют *отказом*.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям нормативно-технической и (или) кон-

структорской документации, выполнение которых обеспечивает применение объекта по назначению. Работоспособный объект может быть неисправным, например не удовлетворять эстетическим требованиям, но его внешний вид не влияет на применение по назначению.

Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение применения объекта по назначению (списание). Вид предельного состояния зависит от конструкции объекта, возможности его ремонта. Все объекты подразделяют на ремонтируемые и неремонтируемые.

Ремонтируемый объект – объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической и (или) конструкторской документацией.

Неремонтируемый объект – объект, ремонт которого не возможен или не предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской документацией.

Большинство изделий машиностроения относят к ремонтируемым объектам. Неремонтируемые объекты – поршневые кольца, фрикционные накладки тормозов и сцеплений, прокладки, манжеты, уплотнительные кольца.

Неремонтируемые объекты могут иметь предельное состояние двух видов. Первый вид совпадает с неработоспособным состоянием. Второй вид связан с тем, что, начиная с некоторого момента времени, применение работоспособного объекта по назначению недопустимо в связи с опасностью или вредностью его использования. Переход неремонтируемого объекта в предельное состояние второго вида происходит раньше возникновения отказа.

Ремонтируемые объекты имеют два вида предельных состояний. При первом виде объект отправляют в ремонт, временно прекращая применение объекта по назначению. При втором виде предельного состояния окончательно прекращают применение объекта по назначению (списывают).

Ремонт – это комплекс операций, предназначенный для восстановления исправности и работоспособности изделий и восстановления технического ресурса изделий и их составных частей.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта, измеряемые в часах, мото-часах, гектарах, километрах пробега и др.

Технический ресурс (ресурс) – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновление после капитального ремонта до перехода в предельное состояние.

Различают два вида ремонта: капитальный и текущий.

Капитальный ремонт выполняют для восстановления исправности и полного (близкого к полному) ресурса изделия с заменой или восстановлением любых составных частей, в том числе и базовых.

Текущий ремонт заключается в восстановлении работоспособности машины с заменой или ремонтом отдельных составных частей, исключая базовые элементы.

Переход восстанавливаемого объекта из неработоспособного состояния в работоспособное или исправное состояние происходит с помощью ремонта.

Восстанавливаемый объект – объект, для которого восстановление работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Невосстанавливаемый объект – объект, восстановление работоспособного состояния которого не предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Переход объекта из предельного состояния в работоспособное или исправное состояние возможен с помощью ремонта, при котором происходит восстановление ресурса объекта в целом.

Надежность включает в себя такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Для каждого объекта характерны все или часть свойств надежности. Так, для объектов, подлежащих длительному хранению, важно свойство сохраняемости.

Безотказность. Это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Это свойство особенно важно для объектов, отказ которых опасен для жизни людей. Отказ рулевого управления или тормозов автомобиля может иметь тяжелые последствия, поэтому для таких объектов безотказность – наиболее важная составная часть надежности.

Первостепенное значение безотказность имеет для объектов, отказ которых вызывает перерыв в работе большого комплекса машин; остановку автоматизированного производства.

Из определения безотказности следует, что ее исчисляют временем или наработкой до момента возникновения отказа, установления причин отказов, виновников их возникновения и разработки мероприятий по снижению вероятности их возникновения. При этом основой классификации отказов являются характер возникновения и особенности протекания процессов, приводящих к отказу (рисунок 1.3).

Отказы делят по причине возникновения, характеру проявления, взаимосвязи, группам сложности и способу обнаружения. Кроме того, отказы бывают ресурсные и деградационные.

По причине возникновения отказы делят на конструктивные, производственные и эксплуатационные.

Конструктивный отказ – отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленных правил и (или) норм конструирования объекта.

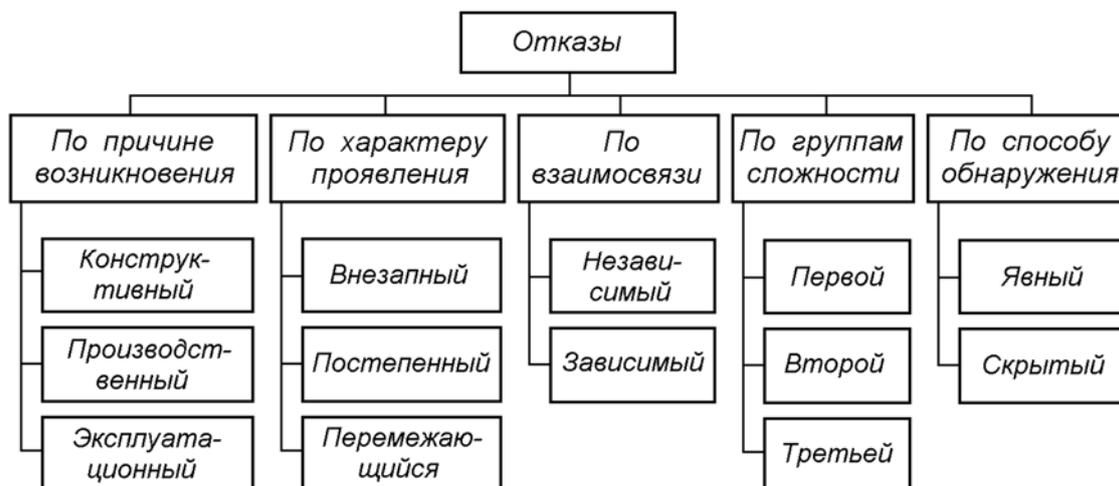


Рисунок 1.3 – Классификация отказов

Конструктивный отказ возникает в результате несовершенства конструкции объекта: при наличии ошибочных исходных данных для проектирования, ошибок при выборе кинематики механизмов, выполнении прочностных расчетов, неправильном назначении материала детали, технических требований на изготовление отдельных элементов и объекта в целом и т.д. Например, для повышения безотказности работы двигателя Д-442-13И заводом-изготовителем установлены следующие детали: гильзы цилиндров с третьей канавкой под резиновое антикавитационное кольцо; промежуточная опора кулачкового вала; трубки высокого давления с конусами, выполненными с упорным кольцом; шестерня коленчатого вала из стали 18ХГТ вместо стали 45 с цементацией и повышенной твердостью зубьев.

Желательно мероприятия по устранению конструктивных отказов проводить на более ранних стадиях производства объекта (на этапе разработки конструкторской документации, испытания опытных образцов, изготовления установочной партии изделий в процессе серийного производства).

Производственный отказ – отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, выполнявшегося на ремонтном предприятии.

Производственные отказы возникают в результате неправильного назначения технологических процессов изготовления или восстановления деталей и сборки объекта или служат следствием нарушения принятой технологии, а также неудовлетворительного качества материала деталей или наносимых на них покрытий, применение недостаточно точных измерительных средств, невыполнения технических требований на изготовление и сборку элементов и объекта в целом. Например, для снижения вероятности поломки коленчатого вала двигателя Д-442-13И завод-изготовитель ввел накатку галтелей шеек коленчатого вала.

Из общего числа рекламаций по отремонтированным двигателям СМД-18 на выплывание и проворачивание вкладышей коленчатого вала приходится 51,8 % и на его излом – 14 %. Причиной первого отказа считают неплоскостность торцов крышки, в результате которой не обеспечивается нормальный зазор в подшипнике, и плохое сцепление антифрикционного слоя с основным металлом. Причины второго отказа – уменьшение радиуса галтели при шлифовании, несоосность коренных опор, наличие трещин у входных отверстий масляных каналов.

Эксплуатационный отказ – отказ, возникающий в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации объекта.

Эксплуатационные отказы возникают вследствие использования объектов в условиях, для которых они не предназначались, нарушения правил эксплуатации (недопустимые перегрузки, невыполнение правил ТО, несвоевременное проведение регулировок, применение не соответствующих требованиям топливо-смазочных материалов, несоблюдение правил транспортировки и хранения). Например, при грубых нарушениях режимов ТО элементов воздушного тракта двигателя КамАЗ-43118 наработка до его отказа уменьшается более чем в 2,5 раза. Для полного износа шатунно-поршневой группы достаточно пропустить через систему питания воздухом 120...150 г абразивной пыли.

Недостатки в установке рукавов высокого давления (снижение радиуса изгиба, трение о металлические детали, скручивание, крепление скобами без эластичных прокладок) приводят к более частым отказам гидросистемы навески тракторов.

Распределение отказов по причине их возникновения для некоторых тракторов (типа МТЗ-82.1 и ДТ-75 при наработке до 5000 ч) приведено в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Распределение отказов для тракторов МТЗ–82.1 и ДТ–75 в зависимости от наработки, %

Интервал наработки, ч	Отказ		
	конструктивный	производственный	эксплуатационный
0...1000	1	63	36
1001...2000	5	50	45
2001...3000	6	41	53
3001...4000	9	31	60
4001...5000	11	25	64

По характеру проявления отказы подразделяют на постепенные, внезапные и перемежающиеся.

Постепенный отказ возникает в результате постепенного изменения значений одного или нескольких заданных параметров объекта.

Главная причина постепенного отказа – естественное старение и изнашивание (увеличение зазоров, ослабление посадок). К характерным примерам постепенных отказов двигателя относят предельный износ деталей и соединений, повышенный расход масла, низкое давление в смазочной системе, снижение мощности и т. д.

Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени от t_1 до t_2 , зависит от длительности предыдущей работы изделия t_1 (рисунок 1.4, а). Чем дольше использовалось изделие, тем выше вероятность возникновения отказа, т. е. $F_2(\Delta t) > F_1(\Delta t)$, если $t_2 > t_1$, где $F_i(\Delta t)$ – вероятность отказа за период от t_i до $(t_i + \Delta t)$.

Для постепенного отказа процесс потери работоспособности $F(t)$ начинается сразу при эксплуатации изделия, а его скорость γ либо постоянна, либо является функцией времени $\gamma(t)$.

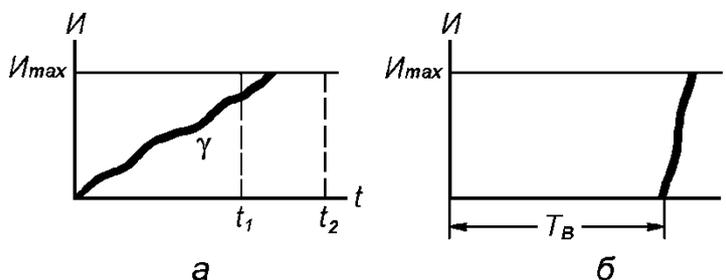


Рисунок 1.4 – Схема возникновения постепенного (а), внезапного (б) отказов

При ТО и ремонтах принимают меры, предупреждающие или увеличивающие наработку до возникновения отказа путем регулировок,

замены быстроизнашивающихся деталей и т. д. Например, при соблюдении рекомендуемого давления в шине, своевременной балансировке колес и регулировке их установки можно значительно увеличить наработку до отказа шины.

Внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта.

Основным признаком внезапного отказа является то, что вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени от t_1 до t_2 , не зависит от длительности предыдущей работы изделия (рисунки 1.4, б).

Примерами таких отказов могут служить тепловые трещины, возникшие в детали вследствие прекращения подачи смазки; поломки детали из-за неправильных методов эксплуатации машины или возникновения перегрузок; деформация или поломка деталей, попавших в непредусмотренные условия работы.

Отказ при этом происходит, как правило, внезапно, без предшествующих симптомов разрушения и не зависит от степени изношенности изделия.

Например, причиной отказа автомобильной покрышки может быть как износ протектора в результате длительной эксплуатации машины, так и прокол, возникший вследствие езды по плохой дороге и неблагоприятного сочетания случайных факторов.

Вероятность отказа покрышки из-за износа протектора у старой покрышки во много раз больше, чем у новой. В противоположность этому – прокол – внезапный отказ – не связан с длительностью работы покрышки до данного события. Вероятность его возникновения одинакова как для новых покрышек, так и для изношенных.

Для внезапного отказа время его возникновения T_B является случайной величиной и подчиняется некоторому закону распределения $f(T_B)$, не зависящему от состояния изделия. Скорость процесса при его возникновении протекает весьма быстро $\gamma \rightarrow \infty$ и не она, а функция $f(T_B)$ определяет вероятность безотказной работы.

Перебегающий отказ – многократно возникающий самоустраняющийся отказ объекта.

Отказ в этом случае многократно возникает и сам устраняется. Пример такого отказа – ухудшение параметров двигателя из-за образования нагара в камере сгорания. При быстрой езде нагар обычно выгорает и отказ самоустраняется.

По взаимосвязи отказы подразделяют на независимые и зависимые. *Независимый отказ* – отказ объекта, не обусловленный отказом другого объекта.

Зависимый отказ – отказ, обусловленный другими отказами. Независимый отказ элемента вызывается потерей работоспособности именно этого элемента, а не является следствием потери работоспособности другого элемента технической системы. Например, поломка зубца шестерни масляного насоса двигателя из-за попадания в насос постороннего предмета относится к независимому отказу. Но отказ насоса может привести к задиру или выплавлению подшипников коленчатого вала, отказ которых является зависимым.

По группам сложности отказы делят на три группы.

Отказы первой группы сложности устраняют заменой или ремонтом деталей, расположенных снаружи агрегатов или сборочных единиц, или же путем внеочередного проведения операций ежесменного ТО (ЕТО) и периодических ТО (ТО-1 и ТО-2). Как правило, эти отказы устраняют механизаторы в полевых условиях.

Отказы второй группы сложности устраняют заменой или ремонтом легкодоступных сборочных единиц и агрегатов с раскрытием внутренних полостей основных агрегатов или проведением операций внеочередного ТО-3. Эти отказы можно устранять в полевых условиях, но с участием персонала передвижных ремонтных средств (мастерской).

Отказы третьей группы сложности устраняют, разбирая основные агрегаты в условиях ремонтных предприятий.

Например, излом по сварке рычага включения переднего моста трактора К-744 – отказ первой группы сложности, трещины трубок масляного радиатора гидросистемы – отказ второй группы, предельный износ подшипника вала ходоуменьшителя – отказ третьей группы сложности.

Для устранения отказов второй и третьей групп часто требуется участие ремонтного персонала, грузоподъемных средств и запасных частей. Так, отказы второй и третьей групп сложности происходят, например, у тракторов типа МТЗ–82.1 и ДТ–75 6–8 раз в год. При этом средняя продолжительность устранения одного отказа без учета ожидания ремонта и запасных частей 2–3 дня, а с учетом последнего 3–3,5 дня для трактора МТЗ–82.1 и 5–6 дней – ДТ–75.

Примеры классификации по группам сложности отказов сельскохозяйственных машин и их агрегатов приведены в таблицах 1.3–1.4.

По способу обнаружения различают явный и скрытый отказы.

Явный отказ – отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению.

К явным относятся такие отказы элементов, на обнаружение которых тратится небольшое время – менее, например, 10 мин (или другой установленной нормы).

Таблица 1.3 – Примеры классификации по группам сложности отказов некоторых агрегатов сельскохозяйственных машин

Группа сложности	Отказ
Первая	<p style="text-align: center;"><u>Блок цилиндра двигателя</u></p> <p>Коррозионное разрушение трубки слива воды из блока. Ослабление крепления, ослабление посадки шкива коленчатого вала. Ослабление болта крепления цапфы передней опоры. Излом деталей механизма натяжения ремня вентилятора. Потеря эластичности уплотнения бокового лючка. Ослабление крепления поддона картера. Нарушение уплотнения крышки привода топливного насоса</p>
Вторая	<p>Износ, изгиб штанги толкателя. Износ, излом шкива, смятие шпонки шкива коленчатого вала. Разрыв наружных шпилек и болтов, срез резьбы в блоке для наружных креплений. Излом крышки распределительных шестерен. Излом трубки подвода смазки (внутри картера распределительных шестерен). Потеря эластичности уплотнения крышки распределительных шестерен или поддона. Износ и выкрашивание зубьев шестерни привода топливного насоса</p>
Третья	<p>Задир, износ упорных полуколец. Изгиб, скручивание шатуна. Износ, проворачивание вкладышей, выкрашивание антифрикционного сплава хотя бы на одном из вкладышей шатунных или коренных подшипников, требующие их замены. Трещина картера распределительных шестерен. Разрыв болта маховика. Износ ведущего пальца маховика. Износ, излом, закоксовывание поршневых колец. Износ, скол более чем двух зубьев венца маховика. Износ шейки, кулачка распределительного вала и скол кулачка. Заклинивание, наволакивание антифрикционного сплава хотя бы на одной шейке коленчатого вала, требующие зачистки швейки</p>

Продолжение таблицы 1.3

Третья	<p>Разрыв шатунного болта. Разрыв, ослабление болта крепления кожуха маховика. Потеря эластичности каркасного сальника заднего конца коленчатого вала. Разрыв, ослабление болтов крепления редуктора пускового двигателя к заднему мосту. Трещина блока (не требующая замены блока). Разрушение, потеря эластичности резинового кольца уплотнения гильзы цилиндра. Срез резьбы на шпильке или под шпильку крепления крышки коренного подшипника картера маховика</p>
Первая	<p align="center"><u>Система топливоподачи двигателя</u></p> <p>Нарушение регулировки форсунки. Излом, износ или коррозия деталей подкачивающей помпы. Излом деталей фильтра очистки топлива. Излом, трещины трубопроводов высокого или низкого давления. Потеря эластичности в соединении трубопроводов</p>
Вторая	<p>Износ, излом, нарушение регулировки деталей и сопряжений топливного насоса или регулятора.</p>
Вторая	<p>Разрыв болта, срез резьбы крепления диска привода топливного насоса. Износ и излом деталей форсунки. Зависание и закоксование иглы распылителя. Трещина, излом кронштейна крепления фильтров. Разрушение, износ муфты опережения впрыска топливного насоса</p>

Примечание: Полный перечень классификации по группам сложности агрегатов приведен в РД 10.2.8-92 «Испытание техники. Надежность. Сбор и обработка информации»

Таблица 1.4 – Примеры классификации по группам сложности отказов сельскохозяйственных машин

Группа сложности	Отказ
Первая	<p>Спадение, разъединение, ослабление натяжения ремней, цепей, тросов и т.д. Ослабления крепления болтов, шплинтов, штырей, шпилек, гаек, пружин, тяг, пальцев, хомутов, кронштейнов, стоек, подшипников, втулок и т.д. Устранение подтекания топливо-смазочных материалов, воды. Нарушение регулировок муфт сцепления, предохранительных муфт и т.д. Перегрев двигателя, подшипников, муфт, редукторов и т.д.</p>

Продолжение таблицы 1.4

Первая	<p>Подгорание контактов, замыкание или пробой электропроводки, нарушение регулировок приборов.</p> <p>Заклинивание (заедание, стопорения, задевание) втулок роликов, звездочек, шкивов, подшипников и т.д.</p> <p>Потеря работоспособности метизов и мелких деталей из комплекта запасных (болтов, гайки, штыри, пружины, пальцы, звенья цепей и гусеничных лент и т.д.)</p>
Вторая	<p>Деформация деталей (валов, осей, шнеков, стоек, кожухов, деталей рам, штанг, подвесок и др.), расположенных в легкодоступных местах.</p> <p>Трещины. Излом или износ деталей (валов, ремней, звездочек, шкивов, карданов, шестерен, стоек, кронштейнов, кожухов, маслопроводов и шлангов гидросистем, тяг, трубок, планок и т.д.), расположенных в легкодоступных местах, для восстановления которых требуется замена или сварка (наплавка).</p> <p>Нарушение регулировок узлов и механизмов, расположенных в труднодоступных местах (требуется раскрытие внутренних полостей основных агрегатов, но без их разборки).</p> <p>Трещина рамы машины (без необходимости разборки)</p>
Третья	<p>Трещины или излом рамы или рам агрегатов (с разборкой).</p> <p>Излом, износ деталей, для восстановления которых требуется разборка основных агрегатов с заменой деталей (диски муфты сцепления, шестерни коробок передач и редукторов, валы двигателей, насоса, вентиляторов и т.д.).</p> <p>Потеря работоспособности машины, требующая замены агрегатов, узлов, механизмов и базисных деталей (двигателя, насоса, вентилятора, коробки передач, редуктора, муфты сцепления, рамы, ведущих и ведомых валов колес и т.д.)</p>

Скрытый отказ – это отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении ТО или специальными методами диагностирования. К скрытым относятся отказы элементов, на обнаружение которых требуется время свыше установленной нормы. Такие отказы часто наблюдаются в гидро-, пневмо- и электросистемах.

Существуют также ресурсный и деградационный отказы.

Ресурсный отказ – отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

Деградационный отказ – отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблю-

дении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Долговечность. Это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и ремонта.

Различие между безотказностью и долговечностью заключается в следующем. Безотказность характеризует свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки, долговечность же характеризует продолжительность работоспособного состояния объекта по суммарной наработке, прерываемой периодами для ТО, ремонта и устранения последствий отказов.

Ремонтопригодность. Это свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения ТО и ремонтов.

Ремонтопригодность – сложное свойство надежности, определяемое назначением объекта и конкретными условиями его эксплуатации. Применительно к сельскохозяйственной технике ремонтпригодность может характеризоваться контролепригодностью, доступностью, лёгкостью, блочностью, взаимозаменяемостью и восстанавливаемостью (рисунок 1.5.).

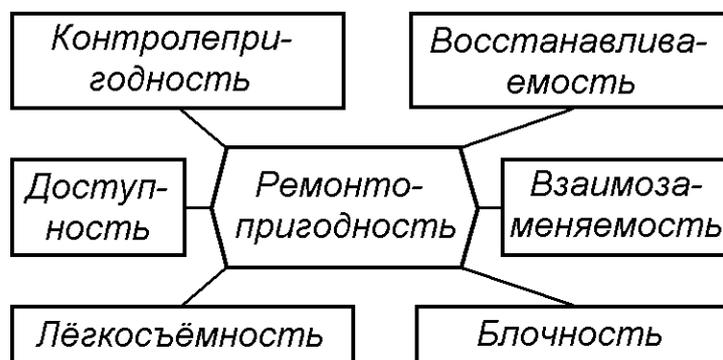


Рисунок 1.5 – Структура ремонтпригодности

Контролепригодность характеризует приспособленность объекта к контролю его технического состояния. Данное свойство важно при оценке технического состояния и поиске отказавшего элемента. Свойство контролепригодности особенно важно для сложных машин, у которых более 50 % времени восстановления уходит на определение места и характера отказа.

Одной из характеристик контролепригодности служит оснащённость машины встроенными средствами контроля. По способу съема

информации их подразделяют на средства непрерывного и периодического контроля.

Первые сигнализируют о техническом состоянии элементов технической системы постоянно, вторые – периодически. Средства непрерывного контроля расположены в кабине машины, периодического – вне кабины. Например, на тракторах типа К-744 встроенных средств контроля 28, из них 19 средств непрерывного контроля расположены в кабине и 9 средств периодического контроля – вне кабины.

Обеспечение приспособленности машины к контролю технического состояния теми или иными методами и средствами неизбежно связано с дополнительными затратами. Однако эти затраты окупаются в результате повышения безотказности, более эффективного использования машины и сокращения расходов на них (техническое обслуживание и ремонт).

Контролепригодность оценивают коэффициентом контролепригодности (K_k)

$$K_k = N_{\text{БС}} / (N_c + N_{\text{БС}}), \quad (1.1)$$

где $N_{\text{БС}}$ и N_c – число агрегатов, контролируемых без снятия и со снятием с машины.

Доступность – приспособленность объекта к удобному выполнению операций ТО и ремонта с минимальным объемом балластных работ (работы по открытию и закрытию панелей, крышек люков, демонтажу и монтажу установленного рядом оборудования, сборочных единиц и деталей при доступе к обслуживаемым элементам объекта).

Доступность оказывает существенное влияние на время и трудовые затраты как при проведении операций ТО, так и при устранении отказов и выполнении ремонтных работ. В понятие «доступность» прежде всего, входит удобство работы исполнителя, заключающееся в возможности достать рукой до любой точки в зоне рабочего места, не меняя удобной позы; отчетливой видимости зоны рабочего места; исключении работы на ощупь; надежности инструмента удерживать и захватывать элемент, на который он воздействует.

Трудоемкость выполнения одной и той же операции зависит от позы, которую вынужден принимать исполнитель (рисунок 1.6).

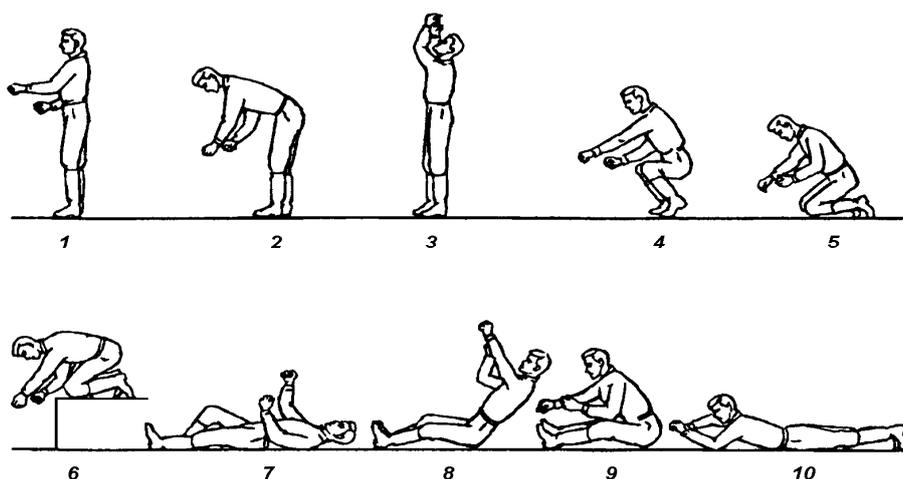


Рисунок 1.6 – Характерные рабочие позы исполнителей при выполнении операций ТО и ремонта:
1–10 – возможные варианты

Доступность может быть оценена коэффициентом доступности

$$K_d = T_{осн} / (T_{осн} + T_{доп}), \quad (1.2)$$

где $T_{осн}$ – трудоемкость выполнения основной работы; $T_{доп}$ – трудоемкость дополнительных (балластных) работ.

Легкосъемность – приспособленность агрегата, блока, сборочной единицы к замене с минимальными затратами времени и труда, а также приспособленность конструкции машины к операциям разборки и сборки.

Легкосъемность во многом определяется системой крепления агрегатов, сборочных единиц, элементов, конструкцией разъемов, массой и габаритами съемных элементов. Необходимо, чтобы детали и соединения, подвергающиеся интенсивному изнашиванию и старению, а также элементы с большой частотой отказов были легкосъемными. В конструкциях машин следует более широко применять быстроразъемные соединения вместо обычных болтов.

Легкосъемность может быть оценена коэффициентом легкосъемности (K_l)

$$K_l = 1 - \Delta T_{дм} / T_{дм}, \quad (1.3)$$

где $\Delta T_{дм}$ – превышение трудоемкости демонтажно-монтажных работ агрегата по сравнению с эталонной; $T_{дм}$ – трудоемкость демонтажно-монтажных работ агрегата.

Блочность – приспособленность конструкции к разборке на отдельные агрегаты и сборочные единицы. Рассмотрим принцип блочности на конструкции трактора ЛТЗ-155.4 (рисунок 1.7), которая включает в себя три основных модуля: энергетический (двигатель, трансмиссия, передний ведущий мост, переднее навесное устройство и передний ВОМ); управляющий (кабина, реверсивный пост управления); технологический (задний ведущий мост, заднее навесное устройство, боковой и два задних ВОМ, грузовая площадка).

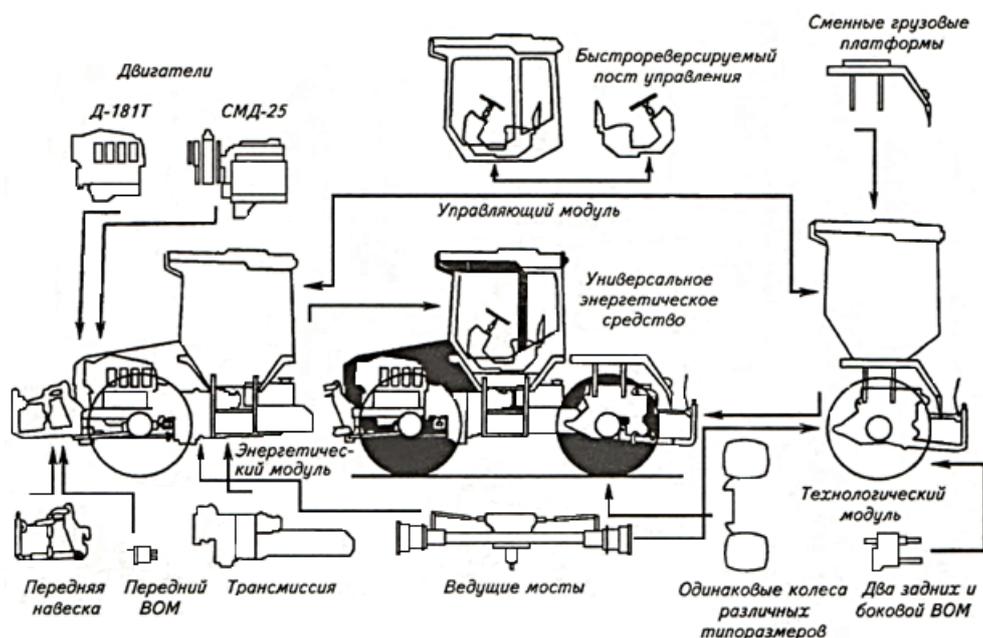


Рисунок 1.7 – Схема блок-модулей трактора ЛТЗ-155.4

Каждый модуль, в свою очередь, состоит из отдельных блоков-модулей. Модуль представляет собой унифицированный, отдельно собираемый, функционально законченный элемент трактора. Например, ходовую систему собирают из ведущих мостов, которые служат блок-модулями. При установке двух ведущих мостов получают трактор тягового класса 2, при установке третьего дополнительного ведущего моста такой же конструкции – трактор тягового класса 3.

К унифицированным блок-модулям относят также бортовые редукторы, элементы навесных устройств, валов отбора мощности (ВОМ) и др.

На тракторе установлен двигатель ЯМЗ 236Д-2 водяного охлаждения. Блок-модулями служат цилиндры этого двигателя, которые, как и головки, имеют одинаковую конструкцию для восьми-, четырех- и двухцилиндровых двигателей Ярославского тракторного завода и выполнены легкоъемными [13].

При модульно-блочном принципе конструирования упрощается не только подготовка производства новой машины (за счет меньшего числа наименований оригинальных деталей и сборки машины из готовых, в том числе унифицированных, блок-модулей), но и ее эксплуатация (за счет уменьшения номенклатуры запасных частей, сокращения простоев при устранении отказов, ремонта блоков на специализированных предприятиях). В результате перестановки модулей-блоков на машине можно увеличить их ресурс. Например, кроме перестановки колес для обеспечения более равномерного изнашивания шин на тракторе ЛТЗ-155.4 можно проводить диагональную перестановку бортовых редукторов с поворотными рычагами. В результате их ресурс можно увеличить в 1,5–2 раза (за счет использования противоположных неизношенных боковых поверхностей зубьев шестерен).

Блочность оценивают коэффициентом блочности (K_B)

$$K_B = N_B / N_0, \quad (1.4)$$

где N_B – число деталей, монтируемых и демонтируемых в блоках; N_0 – общее число деталей в машине.

У трактора ЛТЗ-155.4 коэффициент блочности составляет $K_B = 0,92$.

Взаимозаменяемость – свойство конструкции, агрегата, сборочной единицы, детали и других элементов машин, обеспечивающее возможность их замены при ТО и ремонте без подгоночных работ. Различают внешнюю, внутреннюю и функциональную взаимозаменяемости.

Внешняя взаимозаменяемость характеризует размеры и форму присоединительных поверхностей, и основные эксплуатационные показатели, например, для электродвигателя – это мощность и частота вращения.

Внутренняя взаимозаменяемость характеризует размеры деталей, входящих в сборочные единицы, агрегаты и изделия.

Функциональная взаимозаменяемость характеризует обеспеченность не только сборки и замены при ремонте деталей и сборочных единиц, но и их оптимальные служебные функции. Функциональную взаимозаменяемость можно обеспечить только в том случае, если обеспечена взаимозаменяемость по геометрическим (точность размеров, формы, расположение поверхностей, шероховатость) и кинематическим параметрам, физико-механическим свойствам деталей и их поверхностного слоя. Например, взаимозаменяемый насос гидросистемы

должен иметь заданные подачу, давление и ресурс. Элементы электронных систем кроме геометрической взаимозаменяемости должны иметь взаимозаменяемость по выходным параметрам.

В зависимости от объема подгоночных работ устанавливают соответствующую степень взаимозаменяемости. Чем меньше объем подгоночных работ при замене агрегатов, сборочных единиц и деталей, тем выше степень их взаимозаменяемости.

Взаимозаменяемость оценивают коэффициентом взаимозаменяемости (K_B)

$$K_B = T_{\text{ЗАМ}} / (T_{\text{ЗАМ}} + T_{\text{ПОДГ}}), \quad (1.5)$$

где $T_{\text{ЗАМ}}$ – трудоемкость основной работы при замене агрегата, сборочной единицы, детали, чел.-ч; $T_{\text{ПОДГ}}$ – трудоемкость подгоночных работ, чел.-ч.

Восстанавливаемость – приспособленность конструкции к восстановлению потерянной работоспособности с минимальными затратами труда и средств.

Сложность технологического процесса разборки и сборки машины, наличие базовых поверхностей на деталях, запасов металла у деталей, запасов прочности и жесткости у деталей, обрабатываемых под ремонтные размеры, влияют на восстанавливаемость.

Сохраняемость. Это свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортировки.

Сохраняемость – важное свойство, характеризующее сельскохозяйственную технику, которая работает сезонно. Проблема сохраняемости обостряется в связи с хранением большинства сельскохозяйственных машин на открытых площадках. Атмосферный воздух почти всегда загрязнен различными примесями, многие из которых агрессивны. Существенное влияние на коррозию металлов оказывает содержание в воздухе даже ничтожного количества сернистого газа и хлоридов, которые при растворении в воде образуют электролиты.

Сохраняемость объекта характеризует его способность противостоять отрицательному влиянию условий хранения и транспортировки объекта на его безотказность, долговечность и ремонтпригодность.

Продолжительность хранения и транспортировки иногда не оказывает заметного влияния на поведение объекта во время нахождения в этих режимах, но при последующей работе их свойства могут быть

значительно ниже, чем аналогичные свойства объектов, но не находившихся на хранении и не подлежащих транспортировке. Например, после продолжительного хранения аккумуляторных батарей их наработка до отказа существенно снижается. Сохраняемость таких объектов обычно характеризуется таким сроком хранения в определенных условиях, в течение которого снижение средней наработки до отказа, обусловленное хранением, находится в допустимых пределах.

Вследствие воздействия внешней среды на незащищенные составные части машин во время хранения сокращаются сроки их службы, увеличиваются затраты на ремонт.

Коррозионные поражения во время хранения – одна из главных причин выбраковки втулочно-роликовых цепей (23 %) и сегментов режущих аппаратов жаток зерноуборочных комбайнов (22 %).

Кроме того, эксплуатационные испытания втулочно-роликовых цепей и сегментов режущих аппаратов жаток зерноуборочных комбайнов показали, что условия хранения оказывают влияние на их износ.

При хранении в сыром неотопляемом помещении резиновых манжет в течение 3, 4 и 5 лет их ресурс соответственно снижается до 70, 30 и 3 % ресурса новых манжет. Более 40 % клиновых ремней выбраковывают из-за расслоения и трещин, возникающих вследствие неправильного хранения.

Ресурс резинотехнических изделий снижается и при хранении в сухих отапливаемых помещениях, так как естественный процесс старения можно только замедлить, но предотвратить полностью нельзя.

Ресурс клиновых ремней уменьшается вследствие снижения механической прочности, модуля упругости и прочности связи между элементами конструкции клиновых ремней. Физико-механические свойства клиновых ремней минимально снижаются при их хранении в сухих отапливаемых помещениях при температуре 18...23 °С и относительной влажности воздуха 55...70 %.

Характерные виды коррозионных разрушений деталей машин и вызывающие их причины, приведены в таблице 1.5.

Между воздействием окружающей среды и изменением состояния машин при их хранении имеются закономерные связи. Так, например, интенсивность отказов при хранении с течением времени будет изменяться, как показано на рисунке 1.8.

Таблица 1.5 – Виды коррозионных разрушений деталей машин

Вид разрушения	Узел, деталь	Характер разрушения	Причина разрушения
Атмосферное разрушение	Рамы, обшивка, несущие конструкции и все металлические детали, не имеющие (с разрушенным) лакокрасочного или другого защитного покрытия	Образование рыхлых пленок, окислов с последующим шелушением и возникновением очагов равномерной и точечной коррозии	Действие атмосферных осадков и влажного воздуха
Коррозионно-механический износ (коррозия при трении, фреттинг-коррозия)	Гильзы и поршни двигателей, звездочки, цепи, ручьи шкивов механизмов передач, детали рабочих органов, днища и поверхности трения на обшивках машин и др.	Возникновение на поверхностях коррозионных поврежденных в виде полос, рисок, отдельных пятен или равномерная коррозия	Наличие коррозионно-активной среды и непрерывное разрушение окисленной пленки в точках подвижного контакта
Коррозионная усталость	Оси, валы, детали механизмов газораспределения, отдельные участки рам и тонколистовых обшивок, втулочно-роликовые и др. цепи, шестерни, шлицевые соединения, подшипники качения, пружины и др.	Коррозионные изломы, трещины и разрывы металла	Наличие коррозионной среды и действие знакопеременных напряжений
Коррозионное растрескивание	Болтовые крепежные и сварные соединения и другие детали, испытывающие монтажные напряжения, сельхозмашин и агрегатов.	Коррозионные трещины по границам зерен со снижением прочности металла	Наличие коррозионно-активной среды и действие постоянных напряжений
Коррозионная кавитация	Поверхности гильз и блоков двигателей, поверхности и арматура систем охлаждения, гидросистем и др.	Направление мелких, глубоких питтингов с местами сквозных разрушений	Вибрация и др. воздействие потока жидкости, гидроудары при высоких скоростях движения жидкости и детали в условиях коррозионной среды

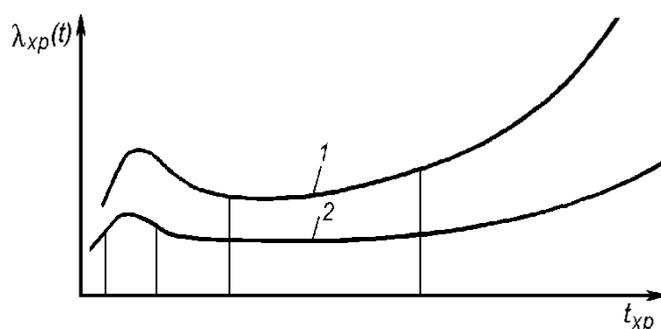


Рисунок 1.8 – Изменение интенсивности отказов агрегатов в зависимости от срока хранения машин:

1 – на открытых площадках; 2 – в закрытых помещениях

Из рисунка видно, что при содержании машин в течение первых лет на хранении наблюдается некоторый рост отказов по причине проявления производственных дефектов, старения отдельных деталей, а также некачественного выполнения работ при обслуживании машин в период постановки их на хранение. В дальнейшем интенсивность при хранении агрегатов стабилизируется и становится постоянным, а затем резко возрастает, особенно при хранении машин на открытых площадках.

1.3. Показатели надежности машин

Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости), составляющих надежность объекта.

В соответствии с ГОСТ 27.002 показатели надежности подразделяют на единичные и комплексные, расчетные, экспериментальные, а также групповые и индивидуальные.

Единичный показатель надежности – показатель, характеризующий одно из свойств (например, долговечность или безотказность), составляющих надежность объекта.

Комплексный показатель надежности – показатель, характеризующий одновременно несколько свойств (два и более), составляющих надежность объекта.

Для сельскохозяйственной техники важны все четыре упомянутых свойства надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость), которые оценивают в отдельности единичными и в совокупности комплексными показателями надежности. Для

такого же объекта, как, например, электролампа, важен показатель долговечности (единичный показатель) и не представляет интереса показатель ремонтпригодности. Поэтому надежность электролампы оценивают только единичным показателем надежности.

Расчетный показатель надежности – это показатель надежности, значения которого определяют расчетным методом.

Экспериментальный показатель надежности – показатель надежности, точечную или интервальную оценку которого определяют по данным эксплуатации.

Групповой показатель надежности служит для оценки надежности совокупности изделий данного типа (вида, марки, модели).

Индивидуальный показатель предназначен для оценки надежности каждого изделия данного типа.

Номенклатура показателей надежности приведена в таблице 1.6, где в качестве независимой переменной t принята наработка (время).

Таблица 1.6 – Номенклатура показателей надежности

Свойство надежности	Наименование показателя	Обозначение
Единичные показатели		
Безотказность	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
	Интенсивность	$\lambda(t)$
	Параметр потока отказов	$\omega(t)$
	Средняя наработка до отказа	\bar{T}_{01}
	Средняя наработка на отказ	\bar{T}_0
	Гамма-процентная наработка до отказа	T_γ
Долговечность	Средний ресурс	\bar{T}_p
	Средний срок службы	$\bar{T}_{сл}$
	Гамма-процентный ресурс	$T_{p\gamma}$
	Гамма-процентный срок службы	$T_{сл\gamma}$
Ремонто-пригодность	Среднее время восстановления	$\bar{T}_в$
	Гамма-процентное время восстановления	$T_{в\gamma}$
	Вероятность восстановления	$P_B(t)$
	Интенсивность восстановления	I_B
	Средняя трудоемкость восстановления	\bar{S}_B
	Удельная суммарная трудоемкость ТО и ремонта	$S_{ТО}, S_P$
	Удельная суммарная трудоемкость восстановления работоспособного состояния	S_B

Продолжение таблицы 1.6

	Объединенная удельная трудоемкость технического обслуживания и ремонта	S
Сохраняемость	Средний срок сохраняемости	\bar{T}_c
	Гамма-процентный срок сохраняемости	T_{cy}
Комплексные показатели		
Комбинация свойств	Коэффициент готовности	K_G
	Коэффициент оперативной готовности	$K_{o.g.}$
	Коэффициент технического использования	$K_{т.и.}$
	Коэффициент сохранения эффективности	$K_{с.э.}$

Общая классификация показателей надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов применительно к сельскохозяйственному производству приведена в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Номенклатура показателей надежности

Тип объекта	Группа надежности			
	Безотказность	Долговечность	Ремонто-пригодность	Сохраняемость
Невосстанавливаемый	$\lambda(t); P(t); F(t); \bar{T}_0$	T_{py}	–	\bar{T}_c
Восстанавливаемый	$\omega(t); P(t); F(t); \bar{T}_0; K_G; K_{т.и.}$	$T_{py}; \bar{T}_p; \bar{T}_{cl}$	$\bar{T}_B; S_{TO}; S_P; \bar{S}_B; K_G; K_{т.и.}$	\bar{T}_c

В таблице приведен еще один часто используемый в расчетах показатель – вероятность отказа $F(t)$. Так как безотказная работа и отказ – взаимно противоположные события, то оценку вероятности отказа определяют по зависимости $F(t) = 1 - P(t)$. При этом для функции $F(t)$ справедливы следующие отношения:

$$0 \leq F(t) \leq 1; F(0) = 0; F(\infty) = 1.$$

Графики изменения показателей $P(t)$ и $F(t)$ приведены на рисунке 1.9. В зависимости от конструктивных особенностей объектов в условиях эксплуатации для оценки их надежности отбирают только часть из перечисленных в таблице 1.7 показателей. Вся совокупность показате-

лей в таких случаях иногда не используется, т.к. это значительно усложняет расчеты и не дает существенных уточнений надежности машин.

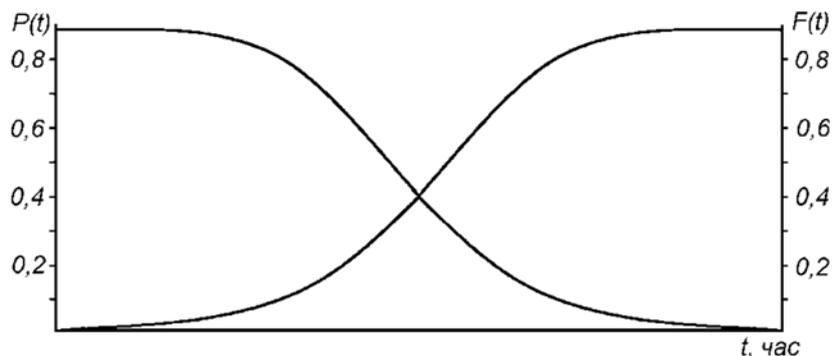


Рисунок 1.9 – График взаимного расположения $F(t)$ и $P(t)$

С учетом достигнутого уровня безотказности по результатам испытаний и общих закономерностях ее изменения определены рекомендуемые показатели на ближайшую экспертизу (таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Рекомендуемые показатели безотказности некоторых тракторов

Тракторы	Тяговый класс, кН	Марка типового трактора	Средняя наработка на отказ II и III групп сложности в условиях эксплуатации	
			реальной	номинальной
Колесные	6	Т-25	300...400	650...700
	9	ЛТЗ-60А	260...300	550...600
	14	МТЗ-82.1	250...300	450...500
	20	ЛТЗ-155.4	250...280	430...470
	50	К-744	200...250	100...450
Гусеничные	20	Т-70СМ	150...200	300...350
	30	ДТ-75	160...220	320...380
	40	Т-4А	120...160	250...280

1.3.1. Единичные показатели надежности

Показатели безотказности. Номенклатура показателей долговечности включает в себя шесть групповых показателей (вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, параметр потока отказов, средняя наработка до отказа, средняя наработка на отказ, гамма-процентная наработка до отказа).

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает.

Вероятность безотказной работы за наработку (время) t определяют по уравнению:

$$P(t) = 1 - n(t)/N, \quad (1.6)$$

где $n(t)$ – число отказавших объектов за наработку (время) t ; N – число объектов совокупности в начале наблюдения.

Вероятность безотказной работы может быть найдена также по интегральной функции безотказности или отказности. Например, вероятность безотказной работы в интервале наработки от 0 до t_0 определяют по уравнению:

$$P(t_0) = 1 - F(t_0), \quad (1.7)$$

Распределение отказов во времени характеризуется дифференциальной функцией наработки до отказа

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{N\Delta t}, \quad (1.8)$$

где $\Delta n(t)$ – приращение числа отказавших объектов за наработку (время) Δt .

Вероятность отказа за наработку (время) t

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (1.9)$$

Вероятность безотказной работы за наработку (время) t

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (1.10)$$

Экспериментальную (статистическую) оценку вероятности безотказной работы можно проверить по формуле:

$$P(t) = \frac{N - N_0}{N} = \frac{\Delta N(t)}{N}, \quad (1.11)$$

где N – число объектов в партии, за которой велось наблюдение; N_0 – число объектов, отказавших за период наблюдения t ; $\Delta N(t)$ – число объектов, которое не отказало во времени t .

Пример 1.1. В течение месяца наблюдение велось за 10 тракторами. При этом за период наблюдения отказал 1 трактор. Необходимо определить вероятность безотказной работы за период наблюдения и вероятность отказа.

Решение:

Из условия примера имеем $N = 10$; $N_0 = 1$; $\Delta N(t) = N - N_0 = 9$. Для определения вероятности безотказной работы воспользуемся формулой (1.11):

$$P(t) = \frac{\Delta N(t)}{N} = \frac{9}{10} = 0,9.$$

Тогда, вероятность отказа $F(t) = 1 - P(t) = 1 - 0,9 = 0,1$.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возникал.

Эта величина используется для характеристики безотказности невосстанавливаемых технических объектов и может быть определена по уравнению:

$$\lambda(t) = \frac{F'(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (1.12)$$

Иначе говоря, интенсивность отказов характеризует долю изделий, отказавших в единицу времени, начиная с момента времени t , отнесенную к числу изделий, работоспособных в момент t .

Интенсивность отказов оценивают по следующей формуле:

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{\Delta t N(t)} = \frac{\Delta N}{\Delta t N(t)}, \quad (1.13)$$

где $N(t)$, $N(t + \Delta t)$ – число работоспособных объектов при наработке t и $(t + \Delta t)$ соответственно; Δt – достаточно малый интервал времени; ΔN – число отказов за период Δt .

Пример 1.2. В начальный период наблюдения все 10 рукавов высокого давления (РВД) на комбайне 3-й размерной группы были работоспособны. Однако через 10 часов 1 рукав порвался без возможности его восстановления. Требуется определить интенсивность отказов РВД.

Решение:

По условиям примера имеем $N(t) = 10$; $N(t + \Delta t) = 9$; $\Delta N = 1$ и $\Delta t = 10$ ч. Используя (1.13), находим интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{\Delta t N(t)} = \frac{10 - 9}{10 \cdot 10} = 0,01 \text{ ч}^{-1}.$$

Пример 1.3. На момент пробега 10 тыс. км на испытании находилось 10 элементов автомобиля, причем через 5 тыс. км осталось 6 исправных элементов. Определить интенсивность потока отказов автомобиля в интервале пробега 5 тыс. км.

Решение:

Интенсивность потока отказов автомобиля $\lambda(l)$ определяется по формуле:

$$\lambda(l) = \frac{N(l) - N(l + \Delta l)}{\Delta N(l)},$$

где $N(l)$, $N(l + \Delta l)$ – количество работоспособных элементов автомобиля за время пробега l и $(l + \Delta l)$ соответственно; Δl – достаточно малый интервал пробега.

Тогда, $\lambda(l) = (10 - 6) / 10 \cdot 5000 = 4 / 50000 = 0,8 \cdot 10^{-4}$.

Величина интенсивности отказов меняется по мере работы машины. Типичный график изменения функции интенсивности отказов $\lambda(t)$ показан на рисунке 1.10 и имеет три характерных участка.

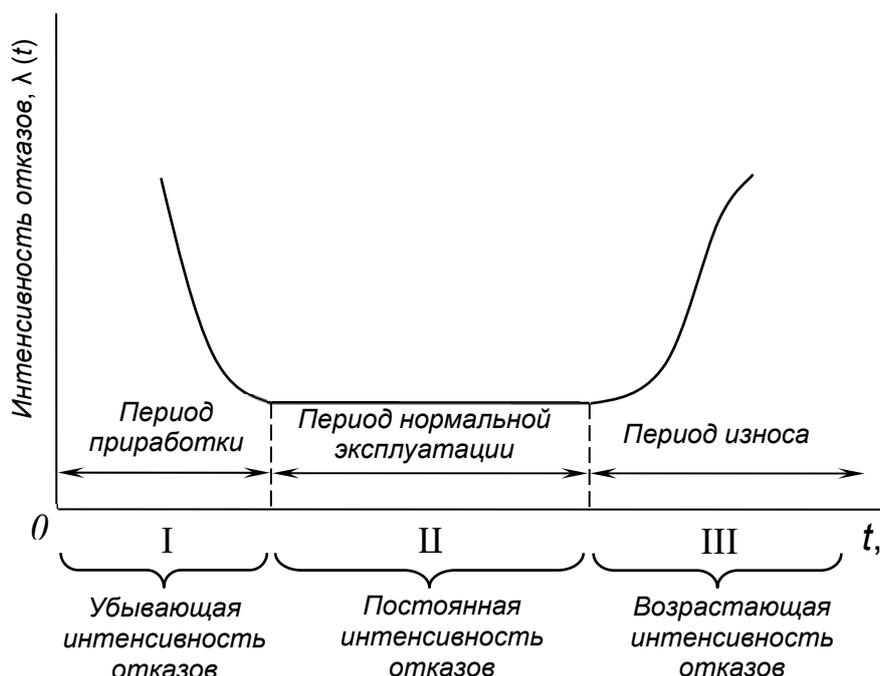


Рисунок 1.10 – График изменения интенсивности отказов во времени

Участок убывающей интенсивности отказов (участок I) называют *периодом приработки* или *периодом ранних отказов*. В начальный момент времени интенсивность отказов велика и обусловлена конструктивными и производственными дефектами, допущенными при проектировании, производстве и эксплуатации.

Участок постоянной интенсивности отказов (участок II) называют *периодом нормальной эксплуатации*. Для участка II характерны внезапные отказы, проявляемые в случайные моменты времени, при этом $\lambda(t) \approx \text{const}$. Этот период начинается сразу же после периода приработки и заканчивается непосредственно перед периодом аварийного износа.

Участок III соответствует периоду старения (износа) или *аварийного изнашивания*, при котором $\lambda(t)$ стремительно растет. Период износовых отказов начинается тогда, когда машина или ее элементы подверглись старению, либо выработали свой ресурс, вследствие чего число отказов в этом периоде (участок III) начинает возрастать.

Между вероятностью безотказной работы и интенсивностью отказов установлена зависимость вида:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (1.14)$$

Параметр потока отказов $\omega(t)$ – это отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за его достаточно малую наработку к значению этой наработки.

Параметр потока отказов, отказов/ед. наработки (времени)

$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^N n_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N n_i(t)}{N \Delta t}, \quad (1.15)$$

где $n_i(t + \Delta t)$, $n_i(t)$ – число отказов i -го объекта при наработке t и $t + \Delta t$ соответственно; N – число испытываемых (наблюдаемых) объектов.

Пример 1.4. В течение одного месяца велось наблюдение за пятью комбайнами. В начальный момент наблюдения один из них оказался неработоспособен. За 100 часов наблюдения были зафиксированы отказы еще двух комбайнов. Необходимо определить параметр потока отказов.

Решение:

Из условия примера $\sum_1^5 n(t) = 1$; $\sum_1^5 n(t + \Delta t) = 1 + 2 = 3$; $\Delta t = 100$ ч; $N = 5$ ед.

Тогда, параметр потока отказов составит:

$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^N n_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N n_i(t)}{N\Delta t} = \frac{3 - 1}{5 \cdot 100} = 0,004 \text{ отказов/час.}$$

Пример 1.5. На испытании находилось 5 элементов автомобиля. В течение 3 тыс. км пробега отказало 2 элемента. Определить параметр потока отказов в интервале пробега 3 тыс. км.

Решение:

Параметр потока отказов $\omega(l)$ определим по уравнению:

$$\omega(l) = \frac{\Delta n_i}{N_i \Delta l_i} = \frac{2}{5 \times 3000} = 0,13 \times 10^{-3},$$

где Δn_i – количество отказов в единицу времени (пробега); N_i – количество испытываемых элементов автомобиля; Δl_i – достаточно малый интервал пробега.

Различие между показателями надежности (интенсивность отказов $\lambda(t)$ и параметр потока отказов $\omega(t)$) заключается в том, что величина $\omega(t)$ характеризует безусловную вероятность возникновения отказа в единицу времени, так как относится к показателям восстанавливаемых объектов, которые в процессе эксплуатации многократно восстанавливаются, а величина $\lambda(t)$ характеризует условную вероятность возникновения отказа в единицу времени, относясь к показателям невосстанавливаемых объектов, отказывающихся только один раз.

В течение срока службы параметр потока отказов изменяется примерно также, как и интенсивность отказов (рисунок 1.11).

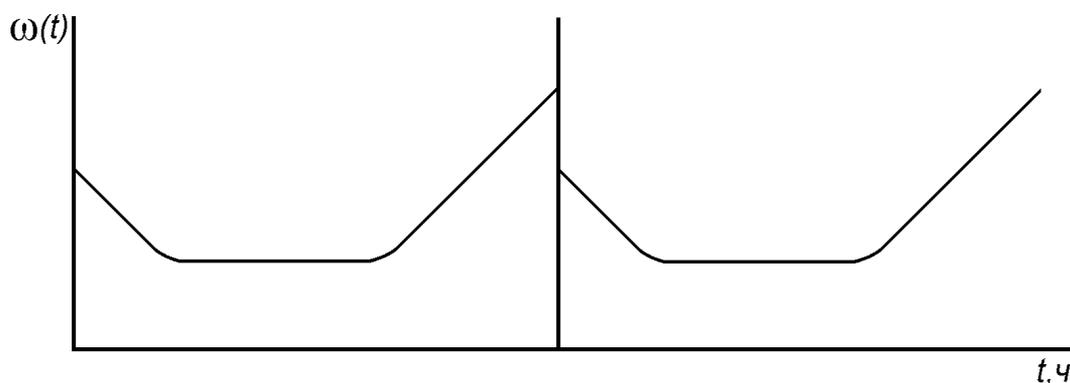


Рисунок 1.11 – График изменения параметра потока отказов

Кроме параметра потока отказов при оценке безотказности объектов можно использовать *средний параметр потока отказов* – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки.

Средняя наработка до отказа \bar{T}_{01} – это математическое ожидание (среднее значение) наработки объекта от начала эксплуатации до первого отказа. Средняя наработка до отказа применяется к невосстанавливаемым объектам и определяется по общему правилу нахождения математического ожидания случайной величины:

$$\bar{T}_{01} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.16)$$

Следовательно, средняя наработка \bar{T}_{01} равна площади под кривой $P(t)$ (рисунок 1.9).

Средняя наработка до отказа для невосстанавливаемых объектов по смыслу соответствует показателю средней наработки до отказа для восстанавливаемых объектов и характеризует действительное время работы невосстанавливаемых объектов до отказа.

Средняя наработка на отказ \bar{T}_0 – это среднее значение наработки восстанавливаемых объектов между отказами. Средняя наработка на отказ может быть выражена через плотность распределения $f(t)$:

$$\bar{T}_0 = \int_0^{\infty} tf(t) dt. \quad (1.17)$$

По результатам наблюдений за эксплуатацией может быть получена статистическая оценка \bar{T}_{01}, \bar{T}_0 (ед. наработки/отказ) для невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов, как:

$$\bar{T}_{01} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.18)$$

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i, \quad (1.19)$$

где t_i – наработка i -го объекта до первого отказа или наработка объекта за время наблюдений; n – число отказов объекта в течение рассматриваемой наработки.

Между средней наработкой на отказ и параметром потока отказов существует зависимость вида:

$$\bar{T}_0 = 1/\omega(t). \quad (1.20)$$

Рассмотрим некоторые примеры определения показателей безотказности в статистической форме.

Пример 1.6. Допустим, что распределение времени безотказной работы некоторого элемента подчиняется экспоненциальному закону. Это значит, что интенсивность отказов λ данного элемента постоянна (что соответствует периоду нормальной эксплуатации, рисунок 1.10). Требуется найти выражение для вероятности безотказной работы и средней наработки на отказ.

Решение:

Известно, что

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1.21)$$

и

$$\lambda(t) = \lambda \quad (1.22)$$

Подставляя соотношение (1.22) в формулу (1.21), находим вероятность безотказной работы $P(t)$:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t}. \quad (1.23)$$

Подставляя выражение (1.21) в формулу (1.17), получаем среднюю наработку на отказ \bar{T}_0 :

$$\bar{T}_0 = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt. \quad (1.24)$$

Интегрируя правую часть этого выражения по частям, имеем:

$$\bar{T}_0 = \left[-te^{-\lambda t} \right]_0^{\infty} - \left[-\frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} \right]_0^{\infty}.$$

Следовательно,

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.25)$$

Данное выражение описывает случай экспоненциального распределения времени безотказной работы элемента. Как следует из формулы (1.25), средняя наработка на отказ является величиной, обратной постоянной интенсивности отказов λ .

Пример 1.7. На 10-ти тракторах типа К-744Р2 лампы накаливания у фар перегорали через следующее количество часов наработки: 1500; 1600; 1800; 2000; 2200; 2100; 2000; 1900; 2000 и 2100. Определить среднюю наработку до отказа для лампы накаливания.

Решение:

Из условия примера известно, что число объектов в начале наблюдения $N = 10$; $t_i = 1500; 1600; 1800; 2000; 2200; 2100; 2000; 1900; 2000; 2100$.

Тогда, средняя наработка до отказа составит:

$$\bar{T}_{01} = \frac{1}{10} \cdot \sum_1^{10} t_i = \frac{19200}{10} = 1920 \text{ ч.}$$

Пример 1.8. На испытании находилось 10 элементов автомобиля, которые вышли из строя при следующих пробегах, тыс. км: 5; 4; 3; 10; 11; 15; 7; 8; 9; 5. Необходимо определить среднюю наработку до отказа элемента автомобиля.

Решение:

Среднюю наработку до отказа элемента автомобиля \bar{L}_{01} определим из выражения:

$$\bar{L}_{01} = \frac{1}{N_0} \cdot \sum_{i=1}^{N_0} l_i,$$

где N_0 – число элементов автомобиля на начало эксперимента; l_i – наработка i -го элемента до отказа.

$$\bar{L}_{01} = \frac{1}{10} \cdot (5 + 4 + 3 + 10 + 11 + 15 + 7 + 8 + 9 + 5) = \frac{77}{10} = 7,7 \text{ тыс. км.}$$

Пример 1.9. На испытании находилось 3 элемента автомобиля. Первый элемент вышел из строя при пробеге 5 тыс. км и был восстановлен. При пробеге 3 тыс. км снова отказал и восстановлен вновь. Второй элемент отказал при пробеге 9 тыс. км, затем восстановлен. Третий отказал при пробеге 11 тыс. км, восстановлен, и автомобиль продолжал работать. Определить среднюю наработку на отказ элементов автомобиля.

Решение:

Среднюю наработку на отказ \bar{L}_0 определяем по формуле:

$$\bar{L}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum N_i l_i = \frac{L}{n},$$

где l_i – наработка i -го элемента на отказ; n – суммарное количество отказов элементов автомобиля за пробег L .

Тогда, $\bar{L}_0 = (5 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 9 \cdot 1 + 11 \cdot 1) / 4 = 4,5$ тыс. км.

Гамма-процентная наработка до отказа – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженная в процентах.

Гамма-процентная наработка до отказа представляет собой доверительную нижнюю границу рассеивания наработки до отказа. При законе нормального распределения гамма-процентная наработка до отказа

$$T_{\gamma/0} = \bar{T}_{01} - H_k(\gamma) \cdot \sigma, \quad (1.26)$$

где \bar{T}_{01} – средняя наработка до отказа; $H_k(\gamma)$ – квантиль закона нормального распределения, определяемый по таблице; σ – среднее квадратическое отклонение.

При законе распределения Вейбулла

$$T_{\gamma/0} = H_k^B(1 - \gamma) \cdot a + C, \quad (1.27)$$

где H_k^B – квантиль закона распределения Вейбулла; a – параметр закона распределения Вейбулла; C – сдвиг (смещение) зоны начала рассеивания наработок до отказа объектов совокупности.

Показатели долговечности. Данные показатели применяются для оценки надежности восстанавливаемых объектов, так как для невозстанавливаемых – понятия долговечности и безотказности идентичны. При этом долговечность объекта оценивается ресурсом и сроком службы.

Ресурс – наработка объектов от начала его эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния. Для объектов, прошедших капитальный ремонт, вводится понятие «средний ресурс между капитальными ремонтами».

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

Ресурс и срок службы могут быть назначенными, т.е. нормативными и указанными в технической документации, а могут быть фактическими, складывающимися под влиянием случайных условий эксплуатации и свойств конкретной машины.

Различают ресурсы до первого капитального ремонта (доремонтный ресурс), между капитальными ремонтами (межремонтный ресурс) и до списания (полный ресурс).

Номенклатура показателей долговечности включает в себя четыре групповых (средний ресурс, средний срок службы, гамма-процентный ресурс и гамма-процентный срок службы) показателя.

Средний ресурс и срок службы – математическое ожидание ресурса и срока службы.

Средний ресурс и срок службы определяют по уравнениям:

$$\bar{T}_p = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_{pi}; \quad (1.28)$$

$$\bar{T}_{сл} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_{сли}, \quad (1.29)$$

где N – число наблюдаемых объектов данного типа; t_{pi} и $t_{сли}$ – соответственно ресурс и срок службы i -го объекта.

Гамма-процентный ресурс T_γ – это суммарная наработка, в течение которой объект не достиг предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах. Другими словами, гамма-процентный ресурс показывает, что γ процентов машин данной модификации должны иметь наработку до предельного состояния не ниже T_γ . При этом величина γ является регламентированной вероятностью:

$$P(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100}. \quad (1.30)$$

При $\gamma = 100\%$ T_γ называется безотказной наработкой. Для $\gamma = 50\%$ ресурс называют медианным. Для тракторов и автомобилей принято нормативное значение γ , равное 0,8. Если, например, $\gamma = 80\%$, то соответствующий ресурс объекта до капитального ремонта называется «восьмидесятипроцентным ресурсом».

Гамма-процентный срок службы T_γ – это календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах. По аналогии с гамма-процентным ресурсом:

$$P(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100}. \quad (1.31)$$

Значение гамма-процентного ресурса можно определить по интегральной кривой отказов или безотказности. Например, для определения 80 %-го гамма-процентного ресурса на оси ординат (рисунок 1.12.) следует найти значение 0,8, провести через эту точку горизонтальную линию до пересечения с интегральной кривой безотказности $P(T_p)$, точку пересечения спроектировать на ось абсцисс и получить отрезок $T_{p\gamma}$, который с учетом масштаба построения графика равен 80 %-му гамма-ресурсу. Аналогично определяют гамма-процентный ресурс по кривой интегральной функции отказов, только вместо точки на оси ординат 0,8, следует найти точку, равную $1 - \gamma = 1 - 0,8 = 0,2$.

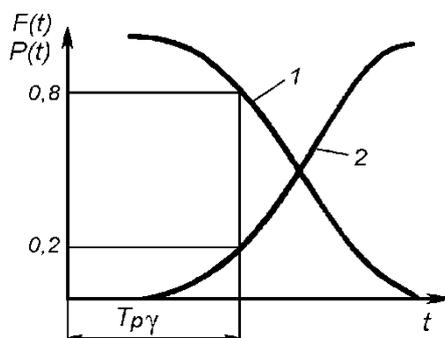


Рисунок 1.12 – Определение 80 %-го гамма-ресурса графическим методом по кривым интегральной функции безотказности (1) и отказности (2)

Аналитически гамма-процентный ресурс и срок службы находят по уравнениям:

При законе нормального распределения

$$T_{p\gamma} = \bar{T}_p - H_k(\gamma) \cdot \sigma; \quad (1.32)$$

$$T_{сл\gamma} = \bar{T}_{сл} - H_k(\gamma) \cdot \sigma, \quad (1.33)$$

где $H_k(\gamma)$ – квантиль закона нормального распределения; σ – среднее квадратическое отклонение.

При законе распределения Вейбулла

$$T_{p\gamma} = H_k^B(1 - \gamma) \cdot a + C, \quad (1.34)$$

$$T_{сл\gamma} = H_k^B(1 - \gamma) \cdot a + C, \quad (1.35)$$

где H_k^B – квантиль закона распределения Вейбулла; a – параметр закона распределения Вейбулла; C – смещение зоны рассеивания ресурса или срока службы.

Показатели ремонтпригодности. Рассмотрим следующие показатели.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа. Оно характеризует продолжительность вынужденного простоя, необходимого для поиска и устранения одного отказа. Его определяют по следующему уравнению:

$$\bar{T}_B = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{Bi}, \quad (1.36)$$

где n – число обнаруженных и устраненных отказов; t_{Bi} – время восстановления i -го объекта.

При определении среднего времени восстановления оценивается свойство машины, а не организационно-технические факторы, влияющие на продолжительность простоя ее в ремонте (например, организация ТО и ремонта, квалификация ремонтников и др.). Поэтому для оценки надежности необходимо учитывать только технологическое (нормативное) время на ремонт.

Гамма-процентное время восстановления – время, в течение которого работоспособность объекта будет восстановлена с вероятностью γ , выраженной в процентах.

При законе нормального распределения времени восстановления гамма-процентное время восстановления

$$T_{B\gamma} = \bar{T}_B - H_K(\gamma) \cdot \sigma. \quad (1.37)$$

При законе распределения Вейбулла

$$T_{B\gamma} = H_K^B(1 - \gamma) \cdot a + C. \quad (1.38)$$

Вероятность восстановления – это вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного.

Вероятность восстановления

$$P_B(t) = P(\bar{T}_B < t), \quad (1.39)$$

где \bar{T}_B – среднее время восстановления; t – заданное время устранения отказа.

Данная величина характеризует приспособленность объекта к проведению текущего ремонта при ограниченных затратах времени.

Для большинства изделий машиностроения вероятность восстановления подчиняется экспоненциальному закону распределения

$$P_B(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1.40)$$

где λ – интенсивность отказов.

При расчете показателей ремонтпригодности учитывают лишь оперативное время обнаружения и устранения отказов.

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

Средняя трудоемкость восстановления – математическое ожидание трудоемкости восстановления работоспособного состояния объекта после отказа. Ее рассчитывают так:

$$\bar{S}_B = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_{Bi}, \quad (1.41)$$

где S_{Bi} – трудоемкость восстановления i -го объекта за некоторый период эксплуатации.

Удельная суммарная трудоемкость технического обслуживания или ремонта, чел.-ч/ед. наработки,

$$\bar{S}_{ТО} = \sum_{i=1}^N S_{ТОi} / \sum_{i=1}^N t_i \quad (1.42)$$

ИЛИ

$$\bar{S}_P = \sum_{i=1}^N S_{Pi} / \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.43)$$

где $S_{ТОi}$ и S_{Pi} – суммарная продолжительность (трудоемкость) технического обслуживания или ремонта i -го объекта за некоторый период эксплуатации; t_i – суммарная наработка i -го объекта за тот же период эксплуатации.

Удельная суммарная трудоемкость восстановления работоспособного состояния, чел.-ч/ед. наработки,

$$S = \sum_{i=1}^N S_{Bi} / \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.44)$$

где S_{Bi} – суммарная трудоемкость непланового текущего ремонта (устранения отказов) i -го объекта за некоторый период эксплуатации.

Объединенная удельная трудоемкость технического обслуживания и ремонта, чел.-ч/ед. наработки,

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^N S_i / \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.45)$$

где S_i – объединенная суммарная трудоемкость технического обслуживания и текущего ремонта i -го объекта за некоторый период эксплуатации.

К числу экономических показателей ремонтпригодности машин относят среднюю суммарную стоимость технического обслуживания (или отдельных операций). Данный показатель характеризует затраты труда, рабочего времени и материалов на проведение технического обслуживания.

Показатели сохраняемости. Сохраняемость оценивают сроком сохраняемости. Срок сохраняемости – это календарная продолжительность хранения и (или) транспортировки объекта, в течение и после которой сохраняются значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в установленных пределах.

Номенклатура показателей сохраняемости включает в себя два групповых показателя: средний срок сохраняемости и гамма-процентный срок сохраняемости.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости объекта. Его определяют по уравнению:

$$\bar{T}_c = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_{ci}, \quad (1.46)$$

где t_{ci} – срок сохраняемости i -го объекта.

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный срок сохраняемости определяют аналогично гамма-процентному ресурсу или сроку службы по интегральной кривой отказности или безотказности или же по аналитическим уравнениям в зависимости от закона распределения срока сохраняемости совокупности объектов при законе:

нормального распределения

$$T_{c\gamma} = \bar{T}_c - H_{\kappa}(\gamma) \cdot \sigma, \quad (1.47)$$

распределения Вейбулла

$$T_{cy} = H_K^B(1 - \gamma) \cdot a + C. \quad (1.48)$$

Большое внимание обеспечению сохраняемости уделяют при создании машин сезонного использования, сменного рабочего оборудования и различных неметаллических элементов (резиновые шланги, пневматические камеры, покрышки и др.).

1.3.2. Комплексные показатели надежности

Каждый из описанных выше показателей позволяет оценить лишь одно из свойств надежности изделия. Для более полной оценки надежности используют комплексные показатели, позволяющие одновременно оценить несколько важнейших свойств изделия.

Номенклатура комплексных показателей надежности включает в себя пять коэффициентов (коэффициенты готовности, оперативной готовности, технического использования, планируемого применения и сохранения эффективности), которые могут служить как групповыми, так и индивидуальными показателями надежности.

Наиболее часто применяемыми на практике комплексными показателями являются коэффициент готовности K_G и коэффициент технического использования $K_{т.и.}$

Коэффициент готовности – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается. При системе обслуживания, предусматривающей немедленное начало восстановления после отказа, данная величина определяется по формуле:

$$K_G = \bar{T}_0 / (\bar{T}_0 + \bar{T}_B), \quad (1.49)$$

где \bar{T}_0 – средняя наработка на отказ; \bar{T}_B – среднее время восстановления работоспособного состояния.

Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к функционированию (применение по назначению) только в отношении его работоспособности и, следовательно, означает вероятность застать объект в работоспособном состоянии в произвольный момент времени. Причем этот момент времени не может быть выбран в тех интервалах, где применение объекта исключено.

Под планируемыми периодами, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, имеют в виду простой машины на плановых технических обслуживаниях, ремонте, хранении и транспортировке.

При расчете коэффициента готовности учитывают только оперативное время устранения отказа. Простои по организационным причинам (вызов ремонтной бригады, поиск и доставка запасных частей и др.) не учитывают.

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент оперативной готовности

$$K_{o.g.} = K_r \cdot P(t_0, t_1), \quad (1.50)$$

где $P(t_0, t_1)$ – вероятность безотказной работы объекта в интервале (t_0, t_1) [здесь t_0 – момент времени, с которого возникает необходимость применения объекта по назначению; t_1 – момент времени, когда применение объекта по назначению прекращается].

Кроме того, иногда коэффициент оперативной готовности определяют так:

$$K_{o.g.} = \bar{T}_0 / (\bar{T}_0 + \bar{T}_в + \bar{T}_{орг}), \quad (1.51)$$

где $\bar{T}_{орг}$ – среднее время простоев по организационным причинам.

Выражение (1.50) используют для определения коэффициента оперативной готовности объектов. Необходимость их использования возникает в произвольный момент времени, после которого объекты должны работать без отказов.

Коэффициент технического использования – это отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Коэффициент технического использования:

$$K_{т.и} = \bar{T}_{сум} / (\bar{T}_{сум} + \bar{T}_{то} + \bar{T}_{рем}), \quad (1.52)$$

где $\bar{T}_{сум}$ – математическое ожидание суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации; $\bar{T}_{то}$, $\bar{T}_{рем}$ – математическое ожидание суммарного времени пребывания объекта в техническом обслуживании и ремонте за тот же период эксплуатации.

Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в рабочем состоянии с учетом простоя в техническом обслуживании, ремонте и устранении отказов.

Так как коэффициент технического использования $K_{т.и}$ учитывает простой машин, как в неплановых, так и в плановых техническим обслуживании и ремонтах, то он всегда меньше коэффициента готовности $K_{г}$. Если в суммарное время простоев из-за плановых и неплановых ремонтов включают время капитального ремонта, то в данном случае величина, рассчитанная по формуле (1.49), часто называется коэффициентом технической готовности.

Из выражений (1.49) и (1.52) следует, что чем меньше среднее время восстановления $\bar{T}_в$ и суммарные простои, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом, тем выше коэффициенты готовности $K_{г}$ и технического использования $K_{т.и}$.

Объемы технического обслуживания и ремонта Q , определяемые исходя из обеспечения требуемого уровня безотказности, существенно влияют на показатель $K_{т.и}$ технического использования и эксплуатационные расходы C (рисунок 1.13). Вместе с тем показатели $K_{т.и}$ и C в значительной степени зависят от уровня R ремонтпригодности конструкции машины.

Коэффициент сохранения эффективности ($K_{с.э}$) – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода эксплуатации не возникают.

Коэффициент сохранения эффективности характеризует степень влияния отказов элементов объекта на эффективность его применения по назначению, а также учитывает изменение эффективности в зависимости от продолжительности эксплуатации изделия.

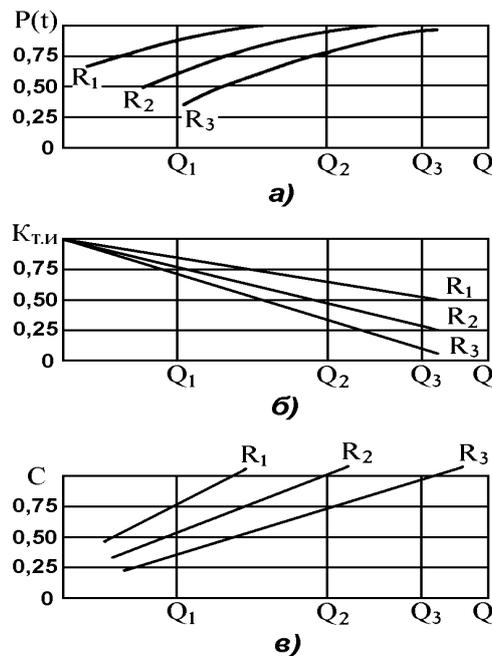


Рисунок 1.13 – Зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ (а), коэффициента технического использования $K_{т.и}$ (б) и эксплуатационных расходов C (в) от объемов ТО и ремонтов Q и уровня ремонтпригодности R

Рассмотрим некоторые примеры определения комплексных показателей надежности в статистической форме.

Пример 1.10. За наблюдаемый период ДТ-75 отказал 2 раза. Причем первая наработка на отказ составила 500 часов, вторая – 700 часов. Первый внеплановый ремонт составил 5 часов, а второй – 15 часов. Требуется определить коэффициент готовности.

Решение:

1. Находим среднюю наработку на отказ:

$$\bar{T}_0 = \frac{700 + 500}{2} = 600 \text{ часов.}$$

2. Рассчитываем среднее время восстановления работоспособного состояния трактора:

$$\bar{T}_в = \frac{5 + 15}{2} = 10 \text{ часов.}$$

3. По формуле (1.49) определяем коэффициент готовности:

$$K_{г} = \frac{600}{600 + 10} = 0,98.$$

Пример 1.11. Для условий примера 1.10. необходимо определить коэффициент технического использования, если продолжительность

простоев машин в плановых технических обслуживаниях и ремонтах за тот же период составила 20 часов.

Решение:

1. Определим суммарную наработку машин за наблюдаемый период эксплуатации:

$$\bar{T}_{\text{сум}} = 500 + 700 = 1200 \text{ часов.}$$

2. Суммарная продолжительность простоев машины:

$$\bar{T}_{\text{то}} + \bar{T}_{\text{рем}} = 5 + 15 + 20 = 40 \text{ часов.}$$

3. По формуле (1.52) находим:

$$K_{\text{т.и}} = \frac{1200}{1200 + 40} = 0,96.$$

Таким образом, надежность машин закладывается при их проектировании и доводке опытного образца, обеспечивается в процессе серийного или массового производства и как одно из важнейших свойств проявляется и поддерживается в процессе эксплуатации.

ГЛАВА 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

2.1. Общие сведения об изнашивании

Трение твердых тел всегда сопровождается их изнашиванием. При этом процесс изнашивания, возникающий при трении сопряженных поверхностей, является основной причиной потери работоспособности для большинства машин.

Изнашиванием (по ГОСТ 27674) называется процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Результат изнашивания, определенный в установленных единицах (длины, объема, массы и др.) называется *износом*. Он характеризует изменение геометрических размеров (линейный износ), массы (весовой износ), объема (объемный износ) детали вследствие изнашивания.

Продуктами процесса изнашивания являются так называемые «частицы износа», представляющие собой диспергированный материал поверхностного слоя, причем размер этих частиц зависит как от материала трущегося тела, так и от режима работы узла трения. Частицы износа удаляются из соединения (например, со смазочным материалом), либо остаются в контакте трущихся тел и оказывают определенное влияние на процесс изнашивания.

Основными количественными показателями изнашивания, в соответствии с общими положениями по оценке степени повреждения, являются: линейный износ, скорость изнашивания, интенсивность изнашивания и износостойкость.

Линейный износ (I , мкм) – изменение размера поверхности при ее износе, измеренное в направлении, перпендикулярном к поверхности трения.

Скорость изнашивания ($\gamma = \frac{dI}{dt}$, мкм/ч) – отношение величины износа ко времени, в течение которого он возник.

Интенсивность изнашивания ($j = \frac{dI}{dQ}$ или $j = \frac{dI}{ds}$) – отношение величины износа к объему выполненной работы (Q) или относительному пути трения (s), на котором происходило изнашивание. Эта величина

будет безразмерной, если линейный износ и путь трения измеряются в одних единицах.

Скорость и интенсивность изнашивания связаны соотношением

$$\gamma = i \cdot v_0, \quad (2.1)$$

где v_0 – скорость относительного скольжения поверхностей трения.

Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания в соответствующих единицах, называют *износостойкостью*.

Выбор износостойких материалов является весьма сложной задачей, так как зависит не только от свойств сопряженных материалов, но и от условий работы данного соединения. Одна и та же пара материалов может в одних условиях быть износостойкой, а в других – нет. Выбор материалов связан, в первую очередь, с оценкой диапазона тех внешних воздействий (силовых, тепловых) и скоростей относительного движения, которые воспринимает данная пара трения.

При выборе материалов для пар трения, помимо требований к их износостойкости, необходимо оценивать и ряд других показателей, которые входят в понятие *антифрикционного материала*.

Выбор износостойких материалов нельзя рассматривать в отрыве от смазки поверхностей, о чем говорилось выше. Чем надежнее смазка смачивает поверхность трения, тем большую роль в обеспечении износостойкости играют ее свойства. Для того чтобы при граничном трении более надежно удерживать или сохранять смазку, применяются пористые материалы или на поверхность трения наносятся специальные рельефы.

Конструкции узлов трения машин весьма разнообразны. В них используются различные сочетания материалов для обеспечения антифрикционных и фрикционных свойств пары.

Опыт эксплуатации некоторых машин позволяет выделить наиболее распространенные сочетания материалов для различных пар трения. Ниже кратко перечислены основные из них.

Сталь – антифрикционный цветной сплав. Сочетание термообработанной, как правило, закаленной или цементированной стали в паре с бронзами на основе олова, цинка, алюминия, свинца, а также с баббитами, широко применяется для подшипников скольжения, различных

типов червячных пар, передач ходовой винт-гайка и других ответственных соединений.

Сочетания из стали и антифрикционного чугуна: закаленная сталь – антифрикционный чугун, сталь по стали, чугун по чугуну часто применяются при сравнительно невысоких скоростях скольжения, например, в направляющих скольжения станков, для пар трения гидросистем, в соединениях гильза цилиндра – поршневые кольца двигателей, для зубчатых и цепных передач, дисков фрикционных муфт и тормозов, для направляющих качения. В фрикционных вариаторах применяют также закаленную сталь по закаленной стали – сочетание, которое допускает высокие контактные нагрузки.

Сталь или чугун – фрикционный сплав. Для тормозных и других устройств, где требуется обеспечение значительного трения на сопряженных поверхностях, применяется сочетание специальных чугунов или сталей с металлическими, полимерными, асбокаучуковыми, асбосмоляными, металлокерамическими и другими фрикционными материалами. Применяется также сочетание сталь – серый чугун, например, при работе железнодорожных тормозных колодок. От этих материалов требуется, в первую очередь, высокая теплостойкость, так как при торможении температура может достигать 1000 °С и выше.

Сталь – самосмазывающийся материал. Это сочетание применяется для соединений с ограниченной внешней смазкой (подшипники скольжения, шарниры и др.) и при относительно небольших скоростях скольжения, когда материал должен обеспечивать подачу смазки (жидкой и твердой) за счет своей структуры. Такими материалами могут являться пористые спеченные псевдосплавы, включающие медь, свинец, графит, а также различные типы пластмасс. Применяются также различного рода покрытия (в том числе биметаллические и полимерные) в сочетании со специальным рельефом поверхности.

Сталь – полимерный материал. Широкие возможности управлять свойствами полимеров за счет состава и структуры основы (матрицы), наполнителей и армирующих материалов, а также за счет технологии их изготовления, приводят к все большему применению пластмасс для пар трения, в основном в сочетании со сталью или реже с чугуном. Их используют для подшипников скольжения, направляющих, зубчатых колес, кулачковых механизмов, фрикционных муфт, тормозов и других узлов пар трения, в том числе при работе без смазки.

Так, для нагруженных узлов трения применяют полимерные материалы на основе полиамидов, которые отличаются теплостойкостью,

возможностью работать без смазки. Однако они плохо воспринимают действие кислот и щелочей. Широкое применение для пар трения находят фторопласты, которые обеспечивают низкий коэффициент трения (до 0,03 без смазки), обладают химической инертностью, хладостойкостью, но малой прочностью и низким коэффициентом теплопроводности. Поэтому их применяют в сочетании с другими материалами в виде наполнителей и вставок.

Применяют также армированные полимеры, композитные материалы на полимерной основе, полимерные покрытия и ряд других специальных материалов и их комбинаций.

Значения износостойкости на практике колеблются в широких пределах $10^3 \dots 10^{13}$. Установлены десять классов износостойкости изделий (таблица 2.1) – от 3 до 12 в соответствии с показателем степени. Классы износостойкости типовых трибосопряжений приведены в таблице 2.2.

При выборе материалов для пар трения целесообразно применять, предложенные А. С. Прониковым *классы износостойкости*, установленные по критерию j или γ . Такая классификация нужна также для прогнозирования надежности при износе машины.

Таблица 2.1 – Классы износостойкости

Класс	Износостойкость	Класс	Износостойкость
3	$10^3 \dots 10^4$	8	$10^8 \dots 10^9$
4	$10^4 \dots 10^5$	9	$10^9 \dots 10^{10}$
5	$10^5 \dots 10^6$	10	$10^{10} \dots 10^{11}$
6	$10^6 \dots 10^7$	11	$10^{11} \dots 10^{12}$
7	$10^7 \dots 10^8$	12	$10^{12} \dots 10^{13}$

Таблица 2.2 – Износостойкость типовых соединений

Узел трения	Класс
Цилиндропоршневая группа автомобиля	12...11
Цилиндропоршневая группа компрессора	10
Направляющие токарного станка	10...9
Колодочный тормоз	7...6
Дисковый тормоз	10...6
Подшипники скольжения	8...5
Зубчатые мелко модульные передачи	8...5
Резцы	8
Калибры	11...10

Классификация по критерию j . Интенсивность изнашивания соединений j изменяется в весьма широких пределах от 10^{-4} (металлорежущий инструмент и др.) до 10^{-12} (калибры, опоры жидкостного трения и др.). Использование интенсивности изнашивания как безразмерной величины не всегда оправдано, так как высокие показатели степени не воспринимаются инженером как конкретная величина. Поэтому более целесообразно уменьшить эти значения в 10^9 раз и измерять j_0 в $\text{мкм} \cdot \text{км}^{-1}$, т.е. оценивать, на сколько мкм износится поверхность при относительном пути трения $S = 1$ км.

В таблице 2.3 приведены классы износостойкости по критерию j и примеры, которые иллюстрируют данную классификацию.

Классификация по критерию γ . Во многих случаях целесообразно применять градацию на классы износостойкости по скорости изнашивания γ . Во-первых, именно скорость изнашивания γ входит в модели отказов при оценке надежности и, во-вторых, эта классификация пригодна для любых законов изнашивания. Кроме того, фактор времени проявляется одинаково для всех соединений машины, а пути трения отдельных пар за тот же промежуток времени весьма различны.

Таблица 2.3 – Классы износостойкости материалов по интенсивности изнашивания

Класс	j_0 , мкм/км	Примеры пар трения
0	$\leq 10^{-4}$	Опоры жидкостного трения
1	$\leq 10^{-3}$	Калибры, шейки коленчатого вала
2	$\leq 10^{-2}$	Поршневые кольца двигателей
3	$\leq 10^{-1}$	Направляющие станков
4	≤ 1	Винт-гайка скольжения
5	≤ 10	Протектор автопокрышки
6	$\leq 10^2$	Открытые зубчатые передачи
7	$\leq 10^3$	Металлорежущий инструмент
8	$\leq 10^4$	Фрикционные тормоза
9	$> 10^4$	Зубья ковша экскаватора

Скорость изнашивания γ целесообразно измерять в мкм/ч, т.е. оценивать, на сколько мкм износится поверхность за 1 час работы изделия (таблица 2.4). Соотношение между интенсивностью и скоростью изнашивания может изменяться в весьма широких пределах, так как они связаны зависимостью (2.8), а скорость скольжения для быстроходных и тихоходных пар может отличаться на несколько порядков в пределах одной машины.

**Таблица 2.4 – Классы износостойкости материалов
по скорости изнашивания**

Класс износостойкости	Скорость изнашивания γ , мкм/ч
0	$\leq 10^{-5}$
1	$\leq 10^{-4}$
2	$\leq 10^{-3}$
3	$\leq 10^{-2}$
4	$\leq 10^{-1}$
5	≤ 1
6	≤ 10
7	$\leq 10^2$
8	$\leq 10^3$
9	$> 10^3$

В обеих классификациях (по j_0 и по γ) к нулевому классу принадлежат наиболее износостойкие пары трения, поэтому, чем выше номер класса, тем меньшую износостойкость обеспечивает данное сочетание материалов при заданных условиях эксплуатации.

Принадлежность соединения к тому или иному классу износостойкости может быть определена из опыта эксплуатации, на основании эксперимента или расчета. Эти классификации следует использовать при назначении требований по износостойкости к соединениям при проектировании машины.

Таким образом, для решения задач надежности машин необходимо, чтобы трибологические исследования были направлены, прежде всего, на отыскание зависимостей, позволяющих оценить интенсивность или скорость процесса изнашивания для возможно большего диапазона условий работ соединений.

В общем виде типовой процесс изнашивания деталей машин можно представить в виде кривой процесса изнашивания в функции от продолжительности изнашивания (рисунок 2.1).

График имеет следующие характерные свойства:

1. Характеристика функции $I(t)$ имеет вид монотонно возрастающей кривой.

2. Процесс изнашивания при работе деталей непрерывен. Поэтому за время Δt можно получить приращение износа ΔI , т. е. закономерный процесс и его производную.

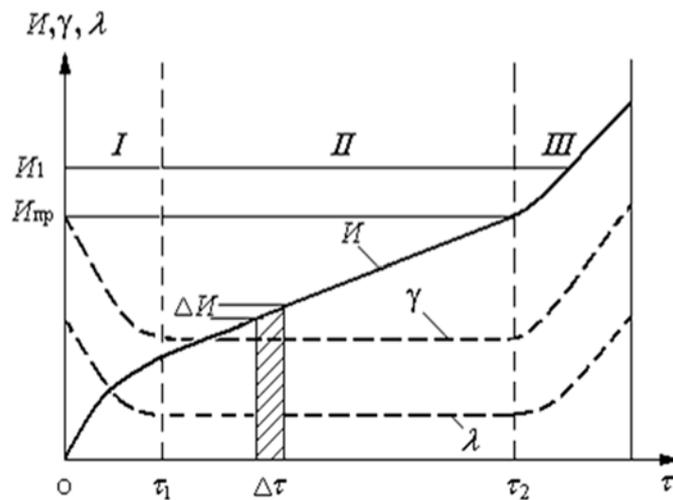


Рисунок 2.1 – Зависимость износа (I) трущихся тел, скорости изнашивания (γ) и интенсивности отказов (λ) от продолжительности изнашивания (τ):
 I – стадия приработки; II – стадия установившегося изнашивания (нормальная работа); III – стадия катастрофического изнашивания (аварийная работа)

3. Кривая для большинства деталей имеет три характерных участка:

а) *первый* – от 0 до t_1 . На этой стадии (I) осуществляется процесс приработки, т.е. процесс изменения геометрии поверхности трения и физико-химических свойств материала. Скорость изнашивания $v_{и}$ и интенсивность отказов λ на этой стадии постепенно снижаются. Продолжительность стадии по времени относительно небольшая;

б) *второй* – от t_1 до t_2 – стадия (II) длительного установившегося изнашивания (нормальной работы). На этой стадии рабочие характеристики и зазоры в сопряжениях не выходят из допустимых пределов. Скорость изнашивания на всей стадии постоянна и равна средней скорости $v_{и} = I / t = \text{const}$. На этой стадии износ нарастает относительно равномерно, почти по прямой линии. При обеспечении нормальных условий работы износ трущихся деталей будет минимальным. Практически зная величину предельного износа $I_{пр}$ детали и скорость изнашивания γ , можно определить срок ее службы:

$$\tau_2 = \frac{I_{пр}}{\gamma}. \quad (2.2)$$

Износ на этой стадии зависит главным образом от условий эксплуатации машин. По своей абсолютной величине продолжительность второй стадии во много раз больше первой. Поэтому срок службы машины в целом определяется обычно продолжительностью этой стадии;

в) *третий* – стадия катастрофического (аварийного) изнашивания (III). Скорость изнашивания резко возрастает, существенно увеличивается накопленный износ. На этой стадии резко увеличивается интенсивность отказов λ трущегося сопряжения, т. е. увеличивается вероятность выхода из строя узла трения. Имеет место износ сверх установленного предела $I_1 > I_{пр}$. При $I(t) > I_{пр}$ наступает отказ.

Поскольку выход из строя узла трения обусловлен изнашиванием их рабочих элементов, для различных деталей можно установить характерный для них предельный износ.

2.2. Виды и характеристики изнашивания

Ввиду сложности процессов, протекающих в поверхностных слоях твердых тел при изнашивании, различия условий и режимов работы узлов трения и причин изнашивания невозможно предложить строгие единичные классификационные признаки всего многообразия процессов изнашивания.

Наибольшее распространение получила классификация по ГОСТ 27674:

- механическое изнашивание (абразивное, гидроабразивное (газообразивное), гидроэрозионное (газоэрозионное), кавитационное, усталостное, изнашивание при фреттинге, изнашивание при заедании);
- коррозионно-механическое (окислительное, изнашивание при фреттинг-коррозии);
- изнашивание при действии электрического тока (электроэрозионное).

Под механическим изнашиванием понимают изнашивание в результате механического воздействия, в отличие от *коррозионно-механического изнашивания*, при котором механическое воздействие сопровождается химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой.

2.2.1. Механическое изнашивание

К механическому изнашиванию относят *абразивное изнашивание*, при котором изнашивание материала происходит в результате режущего или царапающего действия твердых частиц. Такими частицами могут быть микровыступы более твердой сопряженной поверхности, твердые частицы грунта, обрабатываемой породы, металлической

стружки, оксидной пленки, песка и т. д., попавшими в контакт сопряженных деталей. Твердые частицы могут находиться в закрепленном или свободном состоянии.

При гидроабразивном (газоабразивном) изнашивании абразивное изнашивание происходит в результате действия твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости.

Гидроэрозионное (газоэрозионное) изнашивание – изнашивание поверхности тела под воздействием потока жидкой или газовой среды.

Усталостное изнашивание – механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя. Этот процесс имеет скрытый латентный период, вследствие которого происходит накопление повреждений внутри материала. Типичным представителем усталостного изнашивания является *питтинг*, возникающий при трении качения в шариковых и роликовых подшипниках, опорно-поворотных устройствах, катках, вращающихся бандажах и т. д.

Кавитационное изнашивание возникает при перемещении потока жидкости относительно поверхности твердого тела в случае разрыва сплошности этой жидкости, образования каверн, заполненных газом (паром), и последующего захлопывания каверн вблизи поверхности с большой скоростью. При этом ударные волны многократно воздействуют на участок поверхности и приводят к усталостному разрушению последней.

Изнашивание при фреттинге имеет место при малых многократных колебательных относительных перемещениях сопряженных деталей.

Изнашивание при заедании возникает в результате локального соединения двух твердых тел вследствие действия молекулярных сил, последующего глубинного вырывания материала с одной поверхности и переноса его на другую. Этот вид изнашивания имеет место при сухом трении, при разрыве масляной пленки, обнажении и взаимодействии ювенильных поверхностей материалов. При скольжении схватывание на локальных участках может распространяться на большие площади контакта, вызывая глубинное вырывание материала, задиры и заедание узла трения. Последнее может завершиться прекращением относительного движения деталей.

В машинах более 60 % случаев износа имеют абразивный характер. При этом абразивную износостойкость поверхности повышают путем упрочнения материала методами химико-термической, лазерной

или плазменной обработки, а также с помощью различных покрытий повышенной твердости. Эффективным методом защиты сельскохозяйственных машин от абразивного изнашивания является герметизация соединений с помощью уплотнительных элементов, обеспечение чистоты применяемых топлив, масел, рабочих жидкостей. Так, например, фильтрация дизельного топлива перед заправкой машин обеспечивает снижение интенсивности изнашивания деталей топливной аппаратуры в 10 раз. Более 60 % отказов элементов гидросистем сельскохозяйственных машин являются результатом использования загрязненных рабочих жидкостей.

2.2.2. Коррозионно-механическое изнашивание

Коррозионно-механическое изнашивание – изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой.

Вследствие химического или электрохимического взаимодействия с внешней средой происходит разрушение металлов – коррозия, которая может быть сплошной или местной. Сплошная коррозия может быть равномерной и неравномерной. В зависимости от степени локализации различают коррозионные точки, язвы, пятна. По виду разрушения структуры материала местная коррозия подразделяется на подповерхностную, межкристаллитную, избирательную, коррозию растрескиванием.

При трении в коррозионных средах существенно меняется характер и интенсивность разрушения поверхности. При этом силовое воздействие может различаться по виду: контактное взаимодействие пар трения при периодической или знакопеременной нагрузке, при ударе, кавитации, гидро- или газоабразивном, гидродинамическом воздействии.

Окислительное изнашивание – вид коррозионно-механического изнашивания, при котором главную роль играют химические реакции материала с кислородом воздуха или окислительной средой и механические свойства образовавшихся на поверхности оксидных пленок. Оксидные пленки в ряде случаев защищают металл и предотвращают схватывание. При трении в условиях смазки металлическая поверхность окисляется кислородом, растворенным в масле. Оксидные пленки, постепенно разрушаясь, истираются, продукты износа удаляются с маслом. Затем пленка образуется вновь. Таким образом, окисли-

тельное изнашивание представляет собой процесс изнашивания непрерывно возобновляемых оксидных пленок.

Изнашивание при фреттинг-коррозии – вид коррозионно-механического изнашивания соприкасающихся тел при вибрации. В результате вибрационного воздействия происходит усталостное разрушение поверхностных слоев материала, их окисление, абразивное воздействие на поверхность твердых продуктов окисления. На характер и интенсивность этого вида изнашивания влияют одновременно механические процессы деформирования поверхностей и электрохимические процессы взаимодействия с окружающей средой, взаимоинтенсифицирующие друг друга.

2.2.3. Электроэрозионное изнашивание

Электроэрозионное изнашивание – эрозионное изнашивание поверхности в результате взаимодействия разрядов при прохождении электрического тока.

Изнашиванию подвержены скользящие контакты электрических машин и сварочных аппаратов, токосъемы сельскохозяйственных машин и устройств. В радиоэлектронной аппаратуре, средствах автоматики и связи изнашиваются слаботочные подвижные контакты реостатов, потенциометров, кодовых датчиков, реле и др.

Факторы, обуславливающие увеличение износа при прохождении электрического тока, разнообразны. При нагружении контакта током резко усиливаются окислительные процессы. Электрохимический характер окислительных процессов наиболее сильно проявляется на анодно-поляризованных поверхностях. Электрическое поле в зазоре способствует движению кислорода в направлении поверхности. Появление в зоне контакта окисленных твердых частиц износа ведет к интенсификации абразивного изнашивания. Прохождение тока через контакт вызывает тепловыделение и ускорение окислительных процессов. Износ углеграфитовых композитов сильно зависит от внешней среды и ее влажности. Тепловыделение приводит к понижению прочности поверхностных слоев, деструкции связующего в композиционных материалах, термическим напряжениям, диссоциации адсорбированных пленок на металле.

При искро- и дугообразовании помимо перечисленных процессов имеет место электроэрозия. Наличие в зоне контакта композит – металл электрического поля способствует переносу композита на металл или металлизации композита.

К основным методам борьбы с электроэрозионным изнашиванием относятся: создание на поверхностях контакта материалов тонких переходных слоев, не влияющих на процессы передачи тока через контакт и снижающих трение в скользящих контактах, но резко уменьшающих вероятность схватывания, сваривания и интенсивного механического изнашивания; создание композиционных материалов, содержащих электропроводные смазки; создание токопроводных смазочных материалов.

2.2.4. Другие виды изнашивания

Общепринятая классификация не является строгой и не включает многие виды разрушения поверхностей при трении, например, водородное изнашивание, изнашивание при избирательном переносе и др. Разнообразие режимов эксплуатации, в том числе ударных нагрузок на поверхность трения, могут существенно изменять характер абразивного и других видов изнашивания.

Водородное изнашивание. Открытие эффекта водородного изнашивания принадлежит Д. Н. Гаркунову и А. А. Полякову. Появление водорода в поверхностных слоях обусловлено интенсивным его выделением из смазочных материалов, топлива, окружающей газовой среды и неметаллических пар трения в результате трибохимических реакций. Присутствие водорода в поверхностных слоях может быть также результатом процессов литья и химико-термической обработки металлов. Адсорбция водорода, его диффузия в поверхностные слои и концентрация на некоторой глубине от поверхности в области максимальных температур обеспечивается спецификой температурного режима трения.

Разрушение поверхностного слоя, насыщенного водородом, происходит в результате образования большого количества трещин по всей зоне деформирования. Водородное изнашивание наблюдается в насосах, перекачивающих продукты нефтеперегонки, при трении полимерсодержащих тормозных колодок и в других узлах. Уменьшение водородного изнашивания возможно легированием стали хромом, ванадием, титаном; применением смазочных материалов, мало подверженных гидрогенизации; введением в смазочный материал ингибиторов; наполнением пластмассовой матрицы металлической стружкой; наведением электростатического поля.

Изнашивание при избирательном переносе. Скорость изнашивания может быть существенно понижена при формировании в про-

цессе трения на поверхности детали пленок металлов, обладающих не-высокой твердостью: меди, молибдена и др. Образование таких серво-витных пленок связывают с избирательным растворением и осажде-нием отдельных элементов сплавов, содержащих такие металлы. Это явление имеет электрохимическую природу и получило название *изби-рательного переноса* (открыто Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским).

Свойства таких пленок отличаются от свойств медных пленок, по-лученных гальваническим и другим способом. Роль пленки сводится к формированию третьего тела на поверхности контакта, в котором про-исходит разрыв фрикционных связей.

Явление избирательного переноса и образования серво-витной пленки наблюдается в различных парах трения при применении сма-зочных материалов, в состав которых вводят порошки меди, сульфидов, молибдена или бронзы.

Использование эффекта избирательного переноса, позволяет по-лучить коэффициенты трения $0,01...0,005$, интенсивность изнашивания $10^{-10}...10^{-12}$, в то время как при граничной смазке в обычных условиях коэффициент трения составляет $0,05...0,1$ и интенсивность изнашива-ния – $10^{-9}...10^{-10}$. Это дало повод называть явление избирательного пе-реноса «эффектом безызносности».

Учитывая сложность и многофакторность протекающих при тре-нии процессов, рассмотренный выше перечень различных видов изна-шивания не исчерпывает все возможные его виды. Исследование дан-ных процессов и определение вида изнашивания позволяют выработать конкретные меры по снижению этого нежелательного явления.

ГЛАВА 3

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

При решении задач надежности, как правило, применяют один из известных законов распределения, разработанных в теории вероятностей для характеристики случайных величин. Для описания функций распределения случайных величин теория вероятностей дает более широкий выбор законов, выраженных в аналитической форме, которые отражают особенности тех или иных случайных явлений и являются полной характеристикой данной случайной величины [16, 19].

Для проверки соответствия экспериментальных данных высказанной гипотезе о теоретическом распределении в математической статистике разработаны специальные критерии согласия. При использовании законов распределения для оценки надежности машин следует учитывать, что случайной величиной здесь является время работы изделия до отказа $t = T_i$, которое может изменяться в пределах $0 \leq T < \infty$, т. е. принимать только положительные значения. Наиболее распространенные законы распределения для непрерывных случайных величин приведены в таблице 3.1 для плотности вероятности $f(t)$ (закон надежности) и интегральной функции – вероятности безотказной работы $P(t)$.

Эффективность использования машин определяется их показателями надежности в конкретных условиях работы [15]. При этом оценка показателей надежности возможна по результатам наблюдений (испытаний) партии машин в данных условиях эксплуатации, определяемых географическим районом расположения предприятий, характером выполняемых работ, принятой системой технического обслуживания и ремонтов и т.д.

Статистическую оценку показателей надежности дают совокупности объектов, объединенных единым признаком или свойством. Например, детали можно группировать в совокупности по различным признакам: размерам, отклонениям формы, износам; машины по долговечности и т. д. Различают статистическую, генеральную и выборочную совокупности.

Таблица 3.1 – Закон распределения для непрерывных случайных величин

Характеристики распределения (показатели надежности)	Закон распределения		
	экспоненциальный	нормальный (Гаусса)	Вейбулла
Плотность вероятности распределения (частота отказов)	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{T})^2}{2\sigma^2}}$	$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$
Вероятность безотказной работы	$P(t) = e^{-\lambda t}$	$P(t) = \Phi\left(\frac{\bar{T}-t}{\sigma}\right)$	$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$
Функция распределения (вероятность отказов)	$F(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	$F(t) = 1 - P(t) = \Phi\left(\frac{t-\bar{T}}{\sigma}\right)$	$F(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$

*Ф – функция Лапласа (интеграл вероятностей), определяемая по таблице 1 приложения

Статистическая совокупность – это совокупность, состоящая из однородных объектов, обладающих качественной общностью.

Генеральная совокупность – это совокупность объектов, подлежащих исследованию. Однако исследовать все объекты генеральной совокупности обычно не представляется возможным. Поэтому для исследования генеральной совокупности выбирают определенное число объектов, которое называют выборочной совокупностью или выборкой.

Выборочная совокупность (выборка) – определенное число объектов, отобранных из генеральной совокупности для получения объективных сведений о генеральной совокупности

Выборка должна быть подобна генеральной совокупности, чтобы на основании ее можно было достаточно уверенно судить об интересующем признаке генеральной совокупности. Выборка должна быть представительной, каждый объект – отобран случайно и все объекты – иметь одинаковую вероятность попасть в выборку.

Для объективной оценки генеральной совокупности очень важен объем выборки, т. е. число объектов наблюдений, составляющих выборку.

В случае же изучения менее однородного материала метод получения выборки и ее объем приобретают решающее значение.

Так, при испытаниях машин объем выборки оценивают числом одновременно испытываемых машин с учетом полученных от каждой из них точек информации. Малый объем выборки в этом случае может привести к значительным ошибкам и сделать полученные результаты

непригодными для практического использования. Слишком большое число одновременно испытываемых машин, хотя и приведет к более высокой точности расчетов, но будет неприемлемым из-за экономических соображений ввиду высокой стоимости испытаний каждой машины. Поэтому в данном случае необходимо искать оптимальное решение, при котором объем выборки, обеспечивая достаточную точность конечных результатов, не будет слишком большим, а сами испытания – слишком дорогими.

Если во время испытаний у каждого объекта выборочной совокупности будет зафиксирован интересующий исследователя показатель надежности, то полученную таким образом информацию называют *полной*.

Если же испытания ограничивают по времени или наработке объектов и за это время (или наработку) не у всех объектов выборочной совокупности зафиксирован показатель надежности, то такую информацию называют *усеченной*.

При этом возможны также случаи преждевременного снятия с испытаний объектов, у которых не зафиксирован показатель надежности и время или наработка которых не достигли заранее оговоренных условиями испытаний значений. Досрочное снятие машин с испытаний возможно при хозяйственной необходимости, авариях, пожарах и других непредвиденных обстоятельствах. Полученную по такой методике испытаний информацию называют *многократно усеченной*, а преждевременно снятые с испытаний машины – *приостановленными*.

3.1. Сбор информации о показателях надежности машин

Сбор и обработку информации о надежности объектов выполняют с целью усовершенствования конструкции, технологии изготовления, сборки и испытаний объектов, обеспечивающих повышение надежности и безопасности эксплуатации изделий; разработки мероприятий по совершенствованию диагностирования, технического обслуживания, повышения качества текущего и капитального ремонтов и снижения затрат на их проведение; оптимизации норм расхода запасных частей. При этом необходимым условием достижения поставленной цели является организация четкой системы сбора обработки информации о надежности.

Система сбора и обработки информации представляет собой совокупность организационно-технических мероприятий по получению не-

обходимых достоверных сведений о надежности объектов, работающих в различных условиях эксплуатации, оперативную обработку статистических данных и представление результатов в форме, наиболее удобной для анализа надежности машин. Эта система должна охватывать предприятия-разработчики, заводы-изготовители, а также эксплуатационные организации и ремонтные предприятия.

Информация о надежности объекта должна быть *достоверной* (истинной, правильной, отражающей объективные факторы без домыслов и догадок), *полной* (исчерпывающей, содержащей все существенные сведения, которые учитывают во время принятия решений), *однородной* (относящейся к одинаковым объектам, эксплуатирующиеся примерно в одинаковых условиях), *дискретной* (разделена по отдельным признакам), *своевременной* (могла использоваться для изменения конструкций, корректировки технологического процесса изготовления, ремонта и технического обслуживания машины).

Сбор и анализ информации о надежности должны проводиться высококвалифицированными специалистами, знакомыми с основами теории надежности и математической статистики, конструкцией, технологией изготовления машин и правилами их технической эксплуатации.

Основные задачи системы сбора и обработки информации:

- определение показателей надежности объектов;
- выявление конструктивных и технологических недостатков объектов, приводящих к снижению их надежности;
- выявление деталей и сборочных единиц, лимитирующих надежность машины в целом;
- изучение закономерностей возникновения неисправностей и отказов;
- установление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность объекта;
- корректировка нормируемых показателей надежности;
- обоснование структуры ремонтного цикла и периодичности проведения технического обслуживания и ремонта машин;
- определение эффективности мероприятий по повышению показателей надежности машин и их элементов.

Основными источниками получения информации о надежности машин являются специально организуемая подконтрольная эксплуатация и испытания в максимально приближенных к эксплуатационным условиям, оговоренных в нормативно-технической документации.

Подконтрольной эксплуатацией называют эксплуатацию заданного числа машин в строгом соответствии с требованиями технической документации, сопровождаемую контролем технического состояния основных элементов каждой машины специально подготовленным персоналом.

В ходе разработки конструкции информация о надежности объектов поступает из лабораторий, проводящих стендовые испытания опытных образцов, а также с заводов-изготовителей, полигонов, машиноиспытательных станций и организаций, где машины проходят опытную (подконтрольную) эксплуатацию.

Важным источником информации о надежности в гарантийный период эксплуатации объекта служат рекламации от потребителей техники.

Для всесторонней оценки надежности машин и оборудования используют различные источники и методы получения информации (рисунок 3.1). При этом сбор и обработка информации о надежности регламентированы РД 50-204-87, ГОСТ 27.502-83.

Основными методами сбора информации о надежности машин в эксплуатации являются: инструментальный метод, метод хронометража; метод периодических наблюдений; метод, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации [10].

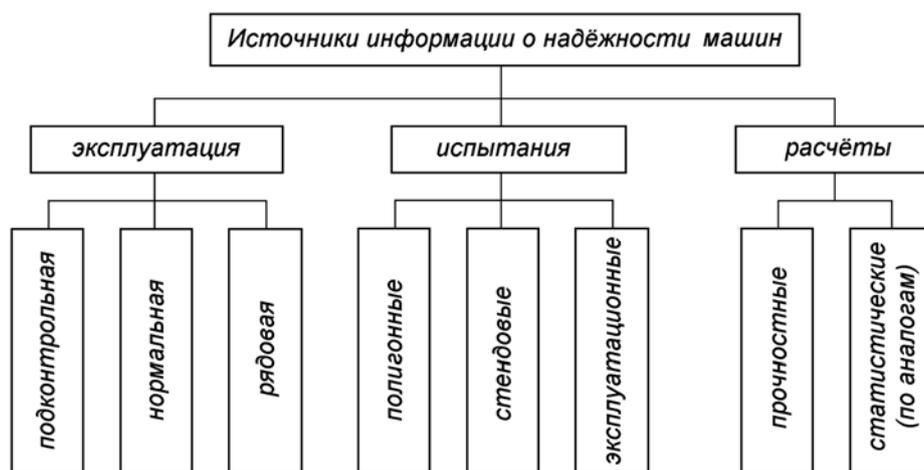


Рисунок 3.1 – Источники информации о надежности машин

Инструментальный метод позволяет получить объективную информацию в наиболее полном объеме. Информацию этим методом собирают, как правило, в условиях подконтрольной эксплуатации при испытаниях машин. В качестве технических средств сбора информации используют специальную контрольно-измерительную аппаратуру и самопишущие приборы, устанавливаемые на исследуемой машине.

Надежность элементов машины в этом случае оценивают по изменению их технического состояния. Основными недостатками данного метода сбора информации являются высокая стоимость исследований, ограниченный объем выборки наблюдаемых машин и организационные трудности, связанные с установкой измерительной аппаратуры и поддержанием ее в исправном состоянии.

Метод хронометража используют для определения чистого времени работы элементов машины, составляющих рабочий цикл машины и оценки интенсивности использования машины в течение смены, а также показателей безотказности и ремонтпригодности (наработка на отказ, средняя наработка до отказа, продолжительность операций технического обслуживания и ремонта и др.). Суть метода заключается в фиксировании моментов начала и окончания работы машины или ее отдельных элементов. Для этого можно также использовать приборы, автоматически регистрирующие наработку исследуемых элементов машин. При сборе информации данный метод широко применяют в сочетании с другими методами.

Метод периодических наблюдений применяют в тех случаях, когда установить постоянные наблюдения за машиной (группой машин) невозможно (например, из-за удаленности объекта). В данном случае информацию собирают на основе результатов периодической экспертизы и опроса машинистов с интервалом не более средней наработки на отказ. Основным недостатком метода является недостаточная достоверность получаемых результатов.

Метод сбора информации, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации, применяется достаточно широко. Основным условием полноты и достоверности информации при использовании данного метода является добросовестное заполнение технической и учетной документации, к которой относятся журналы учета наработок, неисправностей и отказов машин (первичные формы учета); формы-накопители; формы записи результатов анализа надежности. При этом формы учетной документации составлены так, чтобы обеспечить возможность машинной обработки информации (таблица 3.2). Основным недостатком этого метода, как и предыдущего, является низкая достоверность получаемых результатов.

Для повышения достоверности получаемых результатов при сборе информации целесообразно комбинировать перечисленные методы. Это позволяет получить необходимую информацию в более короткие сроки и в полном объеме.

Таким образом, сбор, обработка и анализ информации о надежности объектов связаны с необходимостью исследований случайных событий и величин. При этом все показатели надежности сельскохозяйственных машин относят к категории случайных величин, которые рассчитывают методами теории вероятностей и математической статистики.

Таблица 3.2 – Журнал учета наработок, неисправностей и отказов машин

1. Наименование – трактор			2. Марка – ДТ-75		3. Предприятие-изготовитель		4. Заводской номер	
5. Год и месяц выпуска с предприятия-изготовителя 20.11.2023 с ремонтного предприятия ...			6. Дата начала работы после выпуска или ремонта в данной организации 5.02.2024		7. Общая наработка с начала эксплуатации		8. Время работы 9. Объем выполняемых работ	
10. Наименование организации потребителя:								
№ отказа	Дата проведения	Нарботка на отказ	Место отказа				Вид повреждения	Предполагаемая причина отказа
			Агрегат	Узел	Деталь	Элемент		
1.	25.04.2024	180	Гидросистема	Насос	Вал	Шлицевое соединение	Изнас	Несовершенство конструкции
2.	...	...	...	...	...	...	...	...

3.2. Методика обработки полной информации

Основные принципы, положенные в основу обработки информации:

1. Все показатели надежности относятся к категориям случайных величин.
2. Основными характеристиками каждого показателя надежности являются:
 - среднее значение (математическое ожидание);
 - характеристики рассеивания (среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации V);
 - доверительные границы рассеивания одиночного и среднего значений показателя надежности;
 - наибольшие возможные абсолютная и относительная предельные ошибки.

3. Показатели надежности являются существенными положительными величинами. В связи с этим у них начало зоны рассеивания может существенно смещаться относительно их нулевых значений. Величину смещения (C) следует учитывать при определении коэффициента вариации и последующем подборе теоретического закона распределения показателя надежности.

Информацию обрабатывают в следующем порядке:

1. Составление сводной таблицы исходной информации.
2. Составление статистического ряда исходной информации.
3. Определение среднего значения показателя надежности и среднего квадратического отклонения.
4. Проверка информации на выпадающие точки.
5. Графическое изображение опытной информации.
6. Определение коэффициента вариации.
7. Выбор теоретического закона распределения для выравнивания опытной информации.
8. Оценка совпадения опытного и теоретического законов распределения показателей надежности по критерию согласия.
9. Определение доверительных границ рассеивания одиночного и средних значений показателя надежности.
10. Определение абсолютной и относительной предельных ошибок.

Методику обработки полной информации по показателям надежности рассмотрим на примере доремонтного ресурса двигателя СМД-18.

Составление сводной таблицы исходной информации

Сводная таблица информации (вариационный ряд) составляется в порядке возрастания показателя надежности (таблица 3.3).

Составление статистического ряда исходной информации

Статистический ряд информации составляется для упрощения дальнейших расчетов в том случае, когда повторность исходной информации (количество испытываемых объектов) $N > 25$. При $N < 25$ статистический ряд не составляют.

В нашем примере повторность информации $N = 70 > 25$. Следовательно, целесообразно составить статистический ряд, при этом информацию разбивают на n равных интервалов. Каждый последующий интервал должен примыкать к предыдущему без разрывов. Обычно принимают 6...10. При увеличении их числа повышается точность расчетов, но одновременно возрастает их трудоемкость.

**Таблица 3.3 – Сводная таблица информации
о доремонтных ресурсах двигателя**

Номер двигателя	Доремонтный ресурс, ч	Номер двигателя	Доремонтный ресурс, ч	Номер двигателя	Доремонтный ресурс, ч
1	1500	24	3700	48	4490
2	1870	25	3790	49	4490
3	2010	26	3810	50	4570
4	2010	27	3900	51	4600
5	2720	28	3920	52	4710
6	2900	29	3940	53	4730
7	3020	30	3970	54	4820
8	3060	31	4000	55	4850
9	3060	32	4000	56	4910
10	3180	33	4100	57	4930
11	3200	34	4130	58	4990
12	3210	35	4130	59	4990
13	3210	36	4180	60	5100
14	3260	37	4210	61	5210
15	3300	38	4230	62	5350
16	3300	39	4260	63	5400
17	3300	40	4300	64	5670
18	3420	41	4300	65	5790
19	3460	42	4350	66	5840
20	3480	43	4370	67	5900
21	3580	44	4380	68	5950
22	3610	45	4420	69	5970
23	3620	46	4470	70	7800
		47	4470		

Число интервалов статистического ряда:

$$n = \sqrt{N} \pm 1 \quad (3.1)$$

Полученный результат округляют до ближайшего целого числа. В данном примере $n = \sqrt{70} \pm 1$. Принимаем $n = 9$.

Длина (протяженность) интервала:

$$A = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n}, \quad (3.2)$$

где t_{\max} и t_{\min} – соответственно наибольшее и наименьшее значения показателя надежности в сводной таблице информации.

В данном примере

$$A = (7800 - 1500) / 9 = 700 \text{ ч.}$$

Протяженность интервала всегда округляют в большую сторону. При этом интервалы должны быть одинаковыми по величине.

За начало первого интервала рекомендуют принимать наименьшее значение показателя надежности. В данном примере начало первого интервала $t_{н1} = 1500$ ч.

В первой строке указывают границы интервалов в единицах показателя надежности; во второй строке – число случаев (опытную частоту m_i), попадающих в каждый интервал. Если точка информации попадает на границу интервалов, то в предыдущий и последующий интервалы вносят по 0,5 точки; в третьей строке – опытную вероятность P_i ; в четвертой строке – накопленную опытную вероятность $\sum_{i=1}^n P_i$.

Статистический ряд представлен в следующем виде:

Интервал, тыс. ч	1,5... 2,2	2,2... 2,9	2,9... 3,6	3,6... 4,3	4,3... 5,0	5,0... 5,7	5,7... 6,4	6,4... 7,1	7,1... 7,8
Опытная частота m_i	4	1,5	15,5	19	19	5	5	0	1
Опытная вероятность P_i	0,06	0,02	0,22	0,27	0,27	0,07	0,07	0,00	0,02
Накопленная опытная вероятность $\sum_{i=1}^n P_i$	0,06	0,08	0,30	0,57	0,84	0,91	0,98	0,98	1,00

Опытную вероятность:

$$P_i = \frac{m_i}{N}, \quad (3.3)$$

где m_i – опытная частота в i -м интервале статистического ряда.

Например, опытная вероятность в первом интервале

$$P_i = 4 / 70 = 0,06.$$

Накопленную опытную вероятность определяют суммированием опытных вероятностей интервалов статистического ряда. Например, накопленная опытная вероятность во втором интервале:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0,06 + 0,02 = 0,08.$$

Определение среднего значения показателя надежности и среднего квадратического отклонения

Среднее значение – важная характеристика показателя надежности. По среднему значению планируют работу машин, составляют потребность в запасных частях, определяют объемы ремонтных работ и т. д.

При отсутствии статистического ряда, когда $N < 25$, среднее значение показателя надежности:

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (3.4)$$

где t_i – значение i -го показателя надежности.

При наличии статистического ряда среднее значение показателя надежности:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n t_{ci} P_i, \quad (3.5)$$

где n – число интервалов в статистическом ряду; t_{ci} – значение середины i -го интервала; P_i – опытная вероятность i -го интервала.

В данном примере

$$\bar{t} = 1,85 \cdot 0,06 + 2,55 \cdot 0,02 + 3,25 \cdot 0,22 + 3,95 \cdot 0,27 + 4,65 \cdot 0,27 + 5,35 \cdot 0,07 + 6,05 \cdot 0,07 + 6,75 \cdot 0,00 + 7,45 \cdot 0,02 = 4,15 \text{ тыс. ч.}$$

Характеристика рассеивания показателя надежности – дисперсия или среднее квадратическое отклонение, которое определяют при отсутствии ($N < 25$) статистического ряда по уравнению:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}{N}}, \quad (3.6)$$

При наличии статистического ряда ($N > 25$):

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{ci} - \bar{t})^2 \cdot P_i}. \quad (3.7)$$

В данном примере

$$\sigma = \sqrt{(1,85 - 4,15)^2 0,06 + (2,55 - 4,15)^2 0,02 + (3,25 - 4,15)^2 0,22 + (3,95 - 4,15)^2 0,27 + (4,65 - 4,15)^2 0,27 + (5,35 - 4,15)^2 0,07 + (6,05 - 4,15)^2 0,07 + (6,75 - 4,15)^2 0,00 + (7,45 - 4,15)^2 0,02} = 1,15 \text{ тыс. ч.}$$

Проверка информации на выпадающие точки

Грубую проверку информации проводят по правилу «трех сигм» ($\bar{t} \pm 3\sigma$). В данном примере границы достоверности информации будут равны:

$$\text{нижняя } 4150 - 3 \cdot 1150 \text{ ч} = 700 \text{ ч};$$

$$\text{верхняя } 4150 + 3 \cdot 1150 \text{ ч} = 7600 \text{ ч.}$$

Наименьший доремонтный ресурс двигателя $t_{др1} = 1500$ ч. Следовательно, эта точка информации действительна и должна быть учтена при дальнейших расчетах. Наибольший ресурс двигателя $t_{др70} = 7800$ ч. Эта точка информации выходит за верхнюю границу достоверности. Поэтому она должна быть признана недействительной (выпадающей) и не учитываться в дальнейших расчетах.

Более точно информацию на выпадающие точки проверяют по критерию Ирвина λ , теоретическое значение которого приведено в таблице 11 приложения.

Фактическое значение критерия:

$$\lambda_{оп} = (t_i - t_{i-1}) / \sigma, \quad (3.8)$$

где t_i и t_{i-1} – смежные точки информации.

Наименьшая точка информации:

$$\lambda_{оп1} = (1870 - 1500) / 1150 = 0,32.$$

Наибольшая точка информации:

$$\lambda_{оп70} = (7800 - 5970) / 1150 = 1,59.$$

По таблице 11 приложения находим, что при повторности информации $N = 70$ и доверительной вероятности $\beta = 0,95$, $\lambda_T = 1,05$.

Первую точку информации следует признать достоверной, так как $\lambda_{оп1} = 0,32 < \lambda_T = 1,05$, последнюю точку – выпадающей, так как $\lambda_{оп70} = 1,59 > \lambda_T = 1,05$.

Учитывая, что последняя точка информации выпала, в данном примере после соответствующих пересчетов будем иметь $N = 69$, $\bar{t}_{др} =$

4084 ч, $\sigma = 988$ ч. Окончательно после исключения выпадающей точки статистический ряд примет вид:

Интервал, тыс. ч	1,5...2,2	2,2...2,9	2,9...3,6	3,6...4,3	4,3...5,0	5,0...5,7	5,7...6,4
m_i	4	1,5	15,5	19	19	5	5
P_i	0,06	0,02	0,22	0,28	0,28	0,07	0,07
$\sum_{i=1}^n P_i$	0,06	0,08	0,30	0,58	0,86	0,93	1,00

Графическое изображение опытной информации

По данным статистического ряда могут быть построены гистограмма, полигон и кривая накопленных опытных вероятностей, которые дают наглядное представление об опытном распределении показателя надежности и позволяют решать ряд инженерных задач графическими способами.

Для построения гистограммы (рисунок 3.2) по оси абсцисс откладывают в определенном масштабе показатель надежности t , а по оси ординат – опытную частоту m_i или опытную вероятность P_i .

При построении полигона распределения (рисунок 3.3) по осям абсцисс и ординат откладывают те же значения, что и при построении гистограммы. Точки полигона распределения образуются пересечением ординаты, равной опытной вероятности интервала, и абсциссы, равной середине этого интервала. Начальную и конечную точки полигона распределения приравнивают к абсциссам начала первого и конца последнего интервалов статистического ряда.

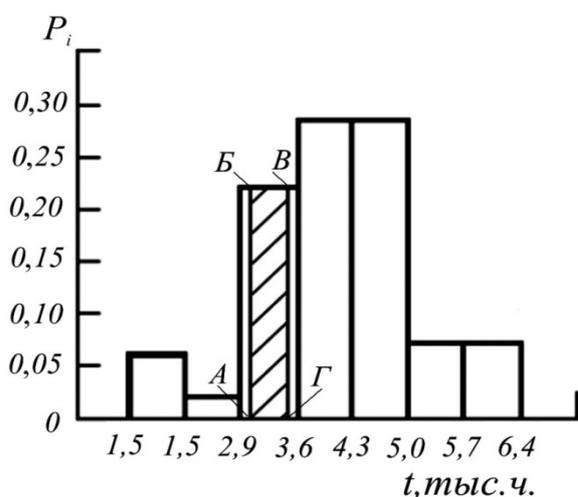


Рисунок 3.2 – Гистограмма накопленных опытных вероятностей

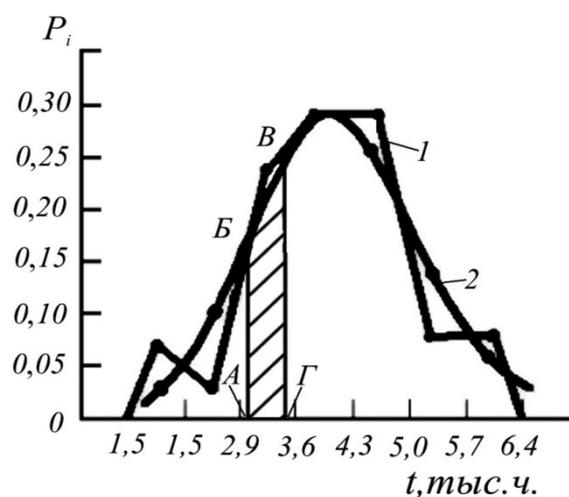


Рисунок 3.3 – Полигон распределения ресурсов двигателя (1) и график дифференциальной функции (2)

С помощью гистограммы и полигона распределения можно определить, например, число двигателей, которые достигнут предельного состояния и потребуют ремонта в заданном интервале наработки. Для этого надо определить площадь полигона или гистограммы $АВВГ$ (см. рисунки 3.2 и 3.3), ограниченную заданным интервалом, например 3,0...3,5 тыс. ч, и отнести ее к суммарной площади под ступенчатым графиком гистограммы или под ломаной линией полигона. Полученное значение укажет на число отказавших двигателей в долях единицы. Для получения числа фактически отказавших двигателей необходимо это значение умножить на число точек информации.

Для построения кривой накопленных опытных вероятностей (рис.4.4) по оси абсцисс откладывают в масштабе значение показателя надежности t , а по оси ординат – накопленную вероятность $\sum_{i=1}^n P_i$. Точки кривой накопленных опытных вероятностей образуются пересечением ординаты, равной сумме вероятностей $\sum_{i=1}^n P_i$, и абсциссы конца данного интервала. Полученные точки соединяют прямыми линиями. Первую точку соединяют с началом первого интервала.

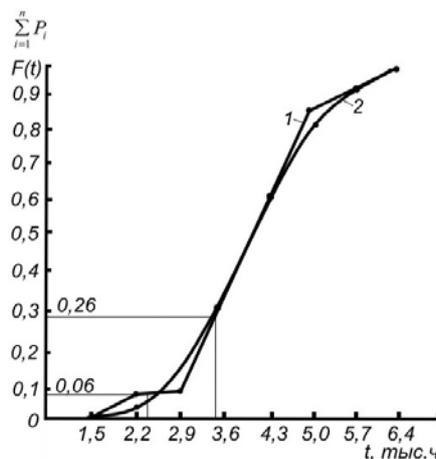


Рисунок 3.4 – Кривая накопленных опытных вероятностей (1) и график(2) интегральной функции (функции распределения)

Кривая накопленных опытных вероятностей более удобна для решения практических задач по сравнению с гистограммой и полигоном распределения, так как в этом случае нет необходимости определять площади, а все искомые показатели находят по оси ординат. Например, для определения числа двигателей, требующих ремонта при наработке до 3,5 тыс. ч, необходимо на оси абсцисс найти точку 3,5 и по оси

ординат определить накопленную опытную вероятность $\sum P_i = 0,26$. Физическое число $N_{\text{двиг}} = 0,26 \cdot 69 = 18$ двигателей.

С помощью этой же кривой можно найти число отказавших двигателей в любом интервале наработки. Например, в интервал наработки 2,5...3,5 тыс. ч: $N_{\text{двиг}} = (0,26 - 0,06) \cdot 69 = 14$ двигателей.

Определение коэффициента вариации

Коэффициент вариации V представляет собой относительную безразмерную величину, характеризующую рассеивание показателя надежности:

$$V = \sigma / (\bar{t} - C), \quad (3.9)$$

где C – смещение рассеивания показателя надежности – расстояние от начала координат до начала рассеивания случайной величины.

При наличии статистического ряда ($N > 25$):

$$C = t_{\text{н1}} - 0,5 \cdot A, \quad (3.10)$$

где $t_{\text{н1}}$ – начало первого интервала статистического ряда; A – длина интервала.

Тогда

$$C = 1500 - 0,5 \cdot 700 \text{ ч} = 1150 \text{ ч.}$$

Коэффициент вариации

$$V = 988 / (4084 - 1150) = 0,34.$$

Выбор теоретического закона распределения

Для выравнивания распределений показателей надежности сельскохозяйственной техники и ее элементов наиболее широко используют закон нормального распределения (ЗНР) и закон распределения Вейбулла (ЗРВ).

В рассматриваемом примере коэффициент вариации равен $V = 0,34$. В этом случае выбираем оба закона распределения (ЗНР или ЗРВ).

Использование для выравнивания распределения опытной информации закона нормального распределения. Закон нормального распределения характеризуется дифференциальной (функцией плотностей вероятностей) и интегральной (функцией распределения) функциями. Отличительная особенность дифференциальной функции

– симметричное рассеивание частных значений показателей надежности относительно среднего значения.

Дифференциальную функцию описывают уравнением:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} \quad (3.11)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение; e – основание натурального логарифма ($e = 2,718$); t_i – показатель надежности; \bar{t} – среднее значение показателя надежности.

Если принять $\bar{t} = 0$ и $\sigma = 1$, то получим выражение для центрированной нормированной дифференциальной функции:

$$f_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t_i^2}{2}} \quad (3.12)$$

Центрированная нормированная функция приведена в таблице 3 приложения.

Для определения дифференциальной функции через центрированную нормированную функцию используют уравнение:

$$f(t) = \frac{A}{\sigma} f_0\left(\frac{t_{ci} - \bar{t}}{\sigma}\right), \quad (3.13)$$

где A – длина i -го интервала; t_{ci} – середина i -го интервала.

Кроме того, следует пользоваться уравнением:

$$f_0(-t) = f_0(+t). \quad (3.14)$$

Определим значение дифференциальной функции в первом интервале статистического ряда нашего примера:

$$\begin{aligned} f(1500\dots2200) &= \frac{700}{988} f_0\left(\frac{1850 - 4084}{988}\right) = 0,71 f_0(-2,26) = 0,71 f_0(2,26) = \\ &= 0,71 \cdot 0,03 = 0,02. \end{aligned}$$

Интегральная функция или функция распределения:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} dt \quad (3.15)$$

При условии $\bar{t} = 0$ и $\sigma = 1$ получим центрированную нормированную интегральную функцию:

$$F_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt \quad (3.16)$$

Эта функция приведена в таблице 4 приложения.

Для определения интегральной функции $F(t)$ через $F_0(t)$ применяют уравнение:

$$F(t) = F_0\left(\frac{t_{ki} - \bar{t}}{\sigma}\right), \quad (3.17)$$

где t_{ki} – значение конца i -го интервала.

При этом используют также уравнение:

$$F_0(-t) = 1 - F_0(+t). \quad (3.18)$$

Определим значение интегральной функции в первом интервале статистического ряда

$$\begin{aligned} F(1500 \dots 2200) &= F_0\left(\frac{2200 - 4084}{988}\right) = F_0(-1,91) = \\ &= 1 - F_0(1,91) = 1 - 0,97 = 0,03. \end{aligned}$$

Рассчитанные аналогичным образом значения дифференциальной и интегральной функций по всем интервалам статистического ряда приведены далее.

Интервал, тыс. ч	1,5...2,2	2,2...2,9	2,9...3,6	3,6...4,3	4,3...5,0	5,0...5,7	5,7...6,4
$f(t)$	0,02	0,09	0,19	0,28	0,24	0,13	0,04
$F(t)$	0,03	0,11	0,31	0,59	0,82	0,95	0,99

На основании полученных значений $f(t)$ и $F(t)$ могут быть построены графики дифференциальной (см. рисунок 3.3) и интегральной функций (см. рисунок 3.4). Дифференциальная кривая заменяет полигон распределения, а интегральная – кривую накопленных опытных вероятностей.

По оси абсцисс дифференциальной и интегральной кривых откладывают в определенном масштабе значения интервалов статистического ряда, а по оси ординат – значения $f(t)$ или $F(t)$. Точки на графике

дифференциальной функции находят на пересечении абсцисс, равных серединам интервалов статистического ряда, и ординат, равных $f(t)$, а на графике интегральной функции – на пересечении абсцисс, равных концам интервалов статистического ряда, и ординат, равных $F(t)$.

Для определения числа двигателей, отказавших в каком-то интервале наработки, нужно площадь под дифференциальной кривой, соответствующую этому интервалу, отнести к общей площади под дифференциальной кривой и полученное значение перемножить на общее число испытываемых двигателей.

Число двигателей, отказавших в каком-либо интервале наработки, на графике интегральной функции определяют перемножением полученного значения по оси ординат на общее число двигателей.

С помощью ранее приведенных уравнений можно определить число отказавших двигателей не только в интервалах статистического ряда, но и в любом интервале наработки. Эту задачу можно решать по дифференциальной или интегральной функции. Например, необходимо определить число двигателей, отказавших в интервале наработки 4300...4850 ч.

Решим по функции:

– дифференциальной

$$f(4300...4850) = \frac{550}{988} f_0 \left(\frac{4575 - 4084}{988} \right) = 0,56 f_0(0,50) = 0,56 \cdot 0,35 = 0,20$$

или $0,20 \cdot 69 = 14$ двигателей;

– по интегральной

$$\begin{aligned} F(4300...4850) &= F(0...4850) - F(0...4300) = \\ &= F_0 \left(\frac{4850 - 4084}{988} \right) - F_0 \left(\frac{4300 - 4084}{988} \right) = \\ &= F_0(0,78) - F_0(0,22) = 0,78 - 0,59 = 0,19 \end{aligned}$$

или $0,19 \cdot 69 = 13$ двигателей

Использование для выравнивания распределения опытной информации закона распределения Вейбулла. Дифференциальную функцию или функцию плотности вероятностей определяют при законе распределения Вейбулла по уравнению:

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^b}, \quad (3.19)$$

где a и b – параметры распределения Вейбулла; e – основание натурального логарифма; t – показатель надежности.

Параметр b определяют по таблице 5 приложения. Для этого необходимо предварительно найти коэффициент вариации. Из таблицы выписывают значение параметра b , коэффициенты K_B и C_B . При $V = 0,34$ $b = 3,2$, $K_B = 0,90$ и $C_B = 0,31$.

Параметр a рассчитывают по одному из уравнений:

$$a = \frac{(\bar{t} - C)}{K_B}; \text{ или } a = \frac{\sigma}{C_B}. \quad (3.20)$$

В данном примере $a = (4084 - 1150) / 0,90 = 3260$ ч.

Дифференциальную функцию определяют по таблице 6 приложения. При этом используют уравнение

$$f(t) = \frac{A}{a} f\left(\frac{t_{ci} - C}{a} \right), \quad (3.21)$$

где A – длина интервала статистического ряда; t_{ci} – середина интервала статистического ряда; C – смещение.

Находят дифференциальную функцию в первом интервале статистического ряда

$$\begin{aligned} f(1500...2200) &= \frac{700}{3260} f\left(\frac{1850 - 1150}{3260} \right) = \\ &= 0,21 f(0,21) = 0,21 \cdot 0,13 = 0,02. \end{aligned}$$

Интегральная функция или функция распределения закона Вейбулла:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^b}. \quad (3.22)$$

Эту функцию определяют по таблице 7 приложения, используя при этом следующее уравнение:

$$F(t) = F\left(\frac{t_{ki} - C}{a} \right), \quad (3.23)$$

где t_{ki} – значение конца i -го интервала.

Например, интегральная функция в первом интервале статистического ряда

$$F(1500...2200) = F\left(\frac{2200 - 1150}{3260}\right) = F(0,32) = 0,03.$$

Аналогично определим значения дифференциальной и интегральной функций в остальных интервалах статистического ряда.

Интервал, тыс. ч	1,5...2,2	2,2...2,9	2,9...3,6	3,6...4,3	4,3...5,0	5,0...5,7	5,7...6,4
$f(t)$	0,02	0,11	0,20	0,24	0,21	0,12	0,05
$F(t)$	0,03	0,13	0,33	0,58	0,81	0,95	0,99

С помощью ранее приведенных уравнений закона распределения Вейбулла можно найти число отказавших двигателей не только в каждом интервале статистического ряда, но и в любом интервале наработки.

Например, определим число отказавших двигателей в интервале наработки 4300...4850 ч, если предположить, что рассеивание ресурса двигателей подчиняется закону распределения Вейбулла. Задача может быть решена как по дифференциальной, так и по интегральной функции. При решении по дифференциальной функции

$$f(4300...4850) = \frac{550}{3260} f\left(\frac{4575 - 1150}{3260}\right) = 0,17 f(1,05) = 0,17 \cdot 1,03 = 0,18$$

или $0,18 \cdot 69 = 12$ двигателей

При решении по интегральной функции

$$F(4300...4850) = F(0...4850) - F(0...4300) = F\left(\frac{4850 - 1150}{3620}\right) - F\left(\frac{4300 - 1150}{3620}\right) =$$

$= F(1,02) - F(0,87) = 0,65 - 0,47 = 0,18$ или $0,18 \cdot 69 = 12$ двигателей

Оценка совпадения опытного и теоретического законов распределения показателей надежности по критерию согласия

Критерий Пирсона χ^2 является наиболее состоятельным при большом цикле наблюдений. Его состоятельность состоит в том, что он почти всегда опровергает неверную гипотезу и обеспечивает минимальную ошибку в принятии неверной гипотезы по сравнению с другими критериями. Этот критерий следует применять в тех случаях, когда теоретические значения параметров функции распределения случайной величины неизвестны.

Критерий согласия Пирсона χ^2 определяется по уравнению:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n_y} \frac{(m_i - m_{\tau i})^2}{m_{\tau i}}, \quad (3.24)$$

где n_y – число интервалов укрупненного статистического ряда; m_i – опытная частота в i -ом интервале статистического ряда; $m_{\tau i}$ – теоретическая частота в i -ом интервале.

Теоретическая частота:

$$m_{\tau i} = N [F(t_i) - F(t_{i-1})], \quad (3.25)$$

где N – число точек информации; $F(t_i)$ и $F(t_{i-1})$ – интегральные функции i -го и $(i-1)$ -го интервалов статистического ряда.

Для определения χ^2 строят укрупненный статистический (вариационный) ряд, соблюдая при этом условия: $n_y > 4$, $m_i \geq 5$. Если же условия не выполняются, допускается объединение соседних интервалов, в которых $m_i < 5$.

Проанализировав статистический ряд информации о доремонтных ресурсах двигателя, можно заметить, что $m_1 = 4$, а $m_2 = 1,5$ меньше пяти, поэтому первый и второй интервалы статистического ряда объединяют. Опытная частота в объединенном интервале будет равна сумме частот объединенных интервалов. В остальных интервалах статистического ряда опытные частоты больше пяти, поэтому эти интервалы оставляем без изменения. Укрупненный статистический ряд будет представлен в следующем виде:

Интервал, тыс. ч	1,5...2,9	2,9...3,6	3,6...4,3	4,3...5,0	5,0...5,7	5,7...6,4
m_i	5,5	15,5	19	19	5	5
При законе нормального распределения:						
$F(t)$	0,11	0,31	0,59	0,82	0,95	0,99
$m_{\tau i}$	7,6	13,8	19,3	15,9	9,0	2,8
При законе распределения Вейбулла:						
$F(t)$	0,13	0,33	0,58	0,81	0,95	0,99
$m_{\tau i}$	9,0	13,8	17,3	15,9	9,7	2,8

Теоретические частоты, например, в первом и втором интервалах при ЗНР определяют следующим образом:

$$m_{\tau 1} = 69 \cdot [0,11 - 0] = 7,6;$$

$$m_{\tau 2} = 69 \cdot [0,31 - 0,11] = 13,8.$$

Для данного примера критерий согласия Пирсона χ^2 при законе нормального распределения:

$$\chi^2 = \frac{(5,5 - 7,6)^2}{7,6} + \frac{(15,5 - 13,8)^2}{13,8} + \frac{(19 - 19,3)^2}{19,3} + \frac{(19 - 15,9)^2}{15,9} + \frac{(5 - 9)^2}{9} + \frac{(5 - 2,8)^2}{2,8} = 4,90;$$

При законе распределения Вейбулла:

$$\chi^2 = \frac{(5,5 - 9)^2}{9} + \frac{(15,5 - 13,8)^2}{13,8} + \frac{(19 - 17,3)^2}{17,3} + \frac{(19 - 15,9)^2}{15,9} + \frac{(5 - 9,7)^2}{9,7} + \frac{(5 - 2,8)^2}{2,8} = 6,35.$$

Для дальнейших расчетов выбирают тот закон распределения, у которого меньше критерий Пирсона χ^2 . Судя по значениям критериев согласия ЗНР и ЗРВ, приходим к выводу, что применительно к доремонтным ресурсам двигателя более приемлемым считают закон нормального распределения.

Кроме того, пользуясь критерием согласия χ^2 (см. приложение 13), определяют вероятность совпадения опытных и теоретических распределений. Для входа в таблицу определяют номер строки

$$N_0 = n_y - K, \tag{3.26}$$

где n_y – число интервалов в укрупненном статистическом ряду; K – число обязательных связей.

Для закона нормального распределения и закона Вейбулла число обязательных связей равно трем: $t, \sigma, \sum_{i=1}^{n_y} p_i = 1$; и $a, b, \sum_{i=1}^{n_y} p_i = 1$.

Для данного примера

$$N_0 = 6 - 3 = 3.$$

Следовательно, значения критериев χ^2 находим в третьей строке таблицы, а вероятность совпадения P – в заглавной строке. Вероятность совпадения ЗНР составляет около 20 %, а ЗРВ – менее 10 %.

Критической вероятностью совпадения принято считать $P = 10\%$. Если $P < 10\%$, то выбранный для выравнивания опытного распределения теоретический закон следует считать непригодным.

Определение доверительных границ рассеивания одиночного и среднего значений показателя надежности

Определение доверительных границ при законе нормального распределения. Количественные характеристики показателей надежности (среднее значение, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации), полученные в результате обработки опытной информации, должны быть перенесены на другие совокупности машин, работающие в других условиях [18].

Изменение числа машин в совокупности и условий их эксплуатации вызовет изменение количественных характеристик показателя надежности. Однако, несмотря на случайный характер, характеристики показателя надежности рассеиваются в определенных границах. Так, одиночное значение показателя надежности конкретной машины может отличаться в 997 случаях из 1000 от \bar{t} на величину $\pm 3\sigma$ при законе нормального распределения и на величину от $0,1a$ до $2,5a$ при законе распределения Вейбулла (где a – параметр закона распределения Вейбулла).

Такая высокая степень доверия расчета, охватывающего 99,7 % всех случаев, при расчете показателей надежности машин считается излишней. Поэтому степень доверия расчета обычно принимают меньше 99,7 % и тем самым сближают границы рассеивания одиночного показателя надежности.

Степень доверия расчета оценивают площадью под дифференциальной кривой, ограниченной осью абсцисс и доверительными границами t_{β}^H и t_{β}^B (рисунок 3.5). Площадь β характеризует степень доверия расчета и гарантирует заданную вероятность попадания показателя надежности в соответствующий интервал его значений. Поэтому ее называют доверительной вероятностью β .

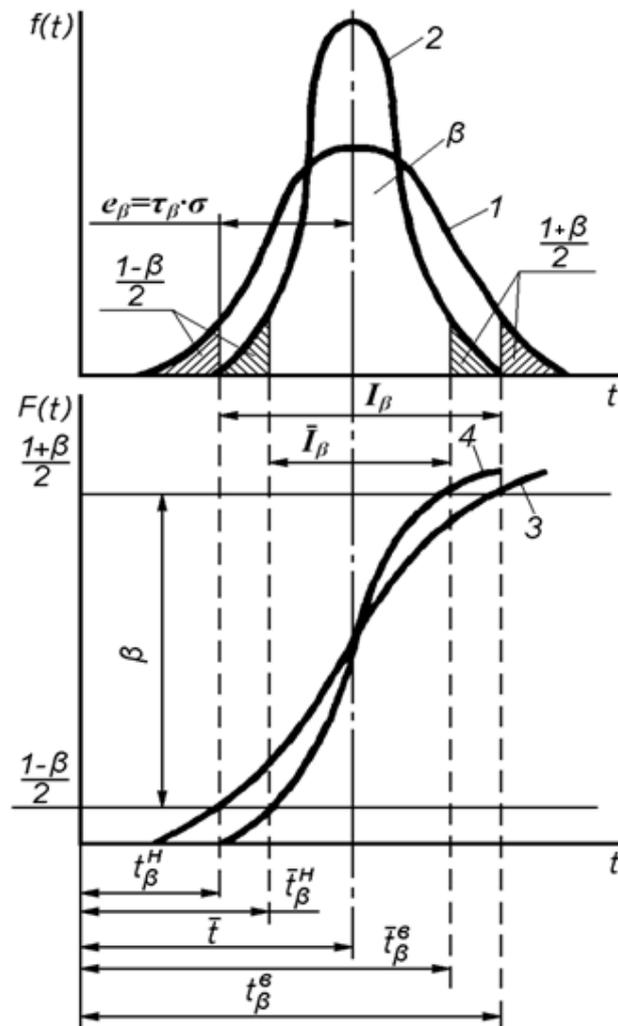


Рисунок 3.5 – Доверительные границы одиночного и среднего значений показателя надежности:

1 и 3 – дифференциальная и интегральная функции одиночного значения;
2 и 4 – дифференциальная и интегральная функции среднего значения

При расчете доверительных границ рассеивания показателей надежности рекомендуется принимать следующие значения доверительных вероятностей β : 0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 0,99.

Интервал, в который при заданной доверительной вероятности β попадает 100 % общего числа объектов совокупности N , называют *доверительным интервалом* I_β .

Границы, в которых может колебаться значение одиночного показателя надежности при заданной β , называют *нижней* t_β^H и *верхней* t_β^B доверительными границами.

Положение доверительных границ и доверительный интервал зависят от доверительной вероятности и закона распределения одиночного или среднего значения показателя надежности.

Определение доверительных границ рассеивания при законе нормального распределения. Для определения доверительных границ рассеивания одиночного значения показателя надежности при законе нормального распределения вначале находят абсолютную ошибку e_{β} (см. рисунок 3.5):

$$e_{\beta} = \tau_{\beta} \cdot \sigma, \quad (3.27)$$

где τ_{β} – коэффициент Стьюдента (принимается по данным таблицы 12 приложения).

Нижняя доверительная граница:

$$t_{\beta}^H = \bar{t} - \tau_{\beta} \sigma, \quad (3.28)$$

где \bar{t} – среднее значение показателя надежности.

Верхняя доверительная граница:

$$t_{\beta}^B = \bar{t} + \tau_{\beta} \sigma. \quad (3.29)$$

Доверительный интервал:

$$I_{\beta} = t_{\beta}^B - t_{\beta}^H. \quad (3.30)$$

Расчетная схема и физический смысл доверительных границ среднего значения показателя надежности те же, что и для одиночного показателя. Разница заключается в значении среднего квадратического отклонения.

Среднее квадратическое отклонение рассеивания среднего значения показателя надежности:

$$\sigma_{\bar{t}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (3.31)$$

где N – число точек информации, по которому определено среднее значение показателя надежности.

Нижняя доверительная граница среднего значения показателя надежности:

$$\bar{t}_{\beta}^H = \bar{t} - \tau_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (3.32)$$

Верхняя доверительная граница среднего значения показателя надежности:

$$\bar{t}_{\beta}^B = \bar{t} + \tau_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (3.33)$$

Доверительный интервал среднего значения показателя надежности:

$$\bar{I}_{\beta} = \bar{t}_{\beta}^B - \bar{t}_{\beta}^H. \quad (3.34)$$

Для примера по обработке информации по ресурсу двигателя коэффициент Стьюдента при $\beta = 0,90$ и $N=69$, $\tau_{\beta} = 1,67$ (см. таблицу 12 приложения), при этом нижняя доверительная граница одиночного показателя надежности

$$t_{\text{др}}^H = 4084 - 1,67 \cdot 988 \text{ ч} = 2434 \text{ ч};$$

Верхняя доверительная граница одиночного показателя надежности

$$t_{\text{др}}^B = 4084 + 1,67 \cdot 988 \text{ ч} = 5734 \text{ ч};$$

Доверительный интервал одиночного показателя надежности

$$I_{\beta} = 5734 - 2434 \text{ ч} = 3300 \text{ ч}.$$

Нижняя доверительная граница среднего значения показателя надежности

$$\bar{t}_{\text{др}}^H = 4084 - 1,67 \frac{988}{\sqrt{69}} = 3885 \text{ ч};$$

Верхняя доверительная граница среднего значения показателя надежности

$$\bar{t}_{\text{др}}^B = 4084 + 1,67 \frac{988}{\sqrt{69}} \text{ ч} = 4283 \text{ ч};$$

Доверительный интервал среднего значения показателя надежности

$$\bar{I}_{\beta} = 4283 - 3885 \text{ ч} = 398 \text{ ч}.$$

Определение доверительных границ при законе распределения Вейбулла. Доверительные границы рассеивания одиночного значения показателя надежности при законе распределения Вейбулла определяют по уравнениям (см. рисунок 3.5):

$$t_{\beta}^H = H_K^B \left(\frac{1-\beta}{2} \right) a + C; \quad (3.35)$$

$$t_{\beta}^B = H_K^B \left(\frac{1+\beta}{2} \right) a + C, \quad (3.36)$$

где H_K^B – квантиль закона распределения Вейбулла (принимается по данным таблицы 14 приложения); a – параметр закона Вейбулла; C – смещение рассеивания.

Доверительный интервал:

$$I_{\beta} = t_{\beta}^B - t_{\beta}^H. \quad (3.37)$$

Доверительные границы рассеивания среднего значения показателя надежности при законе распределения Вейбулла определяют по уравнениям:

$$\bar{t}_{\beta}^H = (\bar{t} - C) \sqrt[b]{r_3} + C; \quad (3.38)$$

$$\bar{t}_{\beta}^B = (\bar{t} - C) \sqrt[b]{r_1} + C; \quad (3.39)$$

$$\bar{I}_{\beta} = \bar{t}_{\beta}^B - \bar{t}_{\beta}^H. \quad (3.40)$$

где r_1 и r_3 – коэффициенты распределения Вейбулла (см. таблицу 12 приложения), зависящие от доверительной вероятности β и повторности информации N ; b – параметр закона распределения Вейбулла.

Для рассматриваемого примера при $\beta = 0,90$ и $N=69$, (см. таблицу 12 приложения) $r_1 = 1,23$ и $r_3 = 0,83$. Тогда

$$t_{\text{др}}^H = H_K^B \left(\frac{1-0,90}{2} \right) \cdot 3260 + 1150 = 0,39 \cdot 3260 + 1150 = 2421 \text{ ч};$$

$$t_{\text{др}}^B = H_K^B \left(\frac{1+0,90}{2} \right) \cdot 3260 + 1150 = 1,41 \cdot 3260 + 1150 = 5757 \text{ ч};$$

$$I_{\beta} = 5747 - 2421 \text{ ч} = 3326 \text{ ч};$$

$$\bar{t}_{\text{др}}^H = (4084 - 1150) \cdot \sqrt[3,2]{0,83} + 1150 \text{ ч} = 3904 \text{ ч};$$

$$\bar{t}_{\text{др}}^B = (4084 - 1150) \cdot \sqrt[3,2]{1,23} + 1150 \text{ ч} = 4289 \text{ ч};$$

$$\bar{I}_{\beta} = 4289 - 3904 \text{ ч} = 385 \text{ ч}.$$

Определение абсолютной и относительной предельных ошибок переноса характеристик показателя надежности

Наибольшая абсолютная ошибка переноса опытных характеристик показателя надежности при заданной доверительной вероятности равна по значению e_{β} в обе стороны от среднего значения показателя надежности.

Относительная предельная ошибка δ_{β} , (%) характеризует степень точности определения среднего значения:

$$\delta_{\beta} = \frac{\bar{t}_{\beta}^B - \bar{t}}{\bar{t} - C} \cdot 100\%. \quad (3.41)$$

$$\delta_{\beta} = \frac{4283 - 4084}{4084} \cdot 100\% = 4,9\%.$$

Следует иметь в виду, что относительная ошибка не должна превышать 20 %. В противном случае необходимо увеличить объем информации (выборки).

3.3. Методика определения количества деталей, годных для дальнейшего использования и требующих восстановления

На основе статистических методов анализа износа различных деталей в узле, а также отдельных поверхностей одной и той же детали можно оценить степень неравномерности их изнашивания, определить количество деталей, годных для дальнейшего использования и требующих восстановления. Эти данные являются исходными для разработки способов повышения износостойкости, а также для выбора и назначения маршрутов восстановления каждой конкретной детали [9, 14].

Методику рассмотрим на примере анализа износов поверхностей первичного вала коробки передач трактора типа МТЗ.

Определение величин износов и составление сводной ведомости исходной информации. По технической документации находят чертеж первичного вала коробки передач. По чертежу определяют, что первичный вал сопрягается шейками с шарикоподшипниками № 208 и № 210, а шлицевыми поверхностями – с шестернями (таблица 3.4).

По картам дефектации деталей определяются дефекты, которые необходимо контролировать, а также способы и средства контроля, размеры чертежный, допустимый в соединении с бывшими в эксплуатации и новыми деталями. Из карты видно, что основными дефектами первичного вала являются износы шлицев по толщине (диаметр 60 мм) и шейки под шарикоподшипник № 210, а также износы шейки под шарикоподшипник № 208 и шлицев по толщине (диаметр 50 мм).

Таблица 3.4 – Технические требования на дефектацию первичного вала (48-1701032) коробки передач трактора (дефекты 1,6)

№ позиции на рисунке	Контролируемый дефект	Способы и средства контроля	Размеры, мм		
			чертежный	допустимый в соединении с деталями	
				бывшими в эксплуатации	новыми
1.	Износ шлицев по толщине	Штанген-зубомер	7,06 ^{+0,03} _{-0,10}	6,80	6,61
6.	Износ шейки под шарикоподшипник № 208	Микрометр	40,00 _{-0,08}	39,99	39,97

Проведем анализ износов шлицев по толщине (дефект 1) и шейки (диаметр 40 мм) под подшипник № 208 (дефект 6).

Предположим, что по результатам замеров толщин шлицев ($d_{изм}$) 48-ми деталей получены следующие данные:

6,91;	6,39;	6,76;	6,31;	6,61;	6,51;	6,22;	6,31;	6,23;	6,11;	6,11;	6,11;
5,91;	6,76;	6,76;	6,31;	6,61;	6,51;	6,31;	6,31;	6,31;	6,91;	6,51;	6,41;
6,23;	6,01;	6,40;	6,31;	6,61;	6,51;	6,38;	6,31;	6,26;	6,40;	6,37;	6,31;
6,23;	6,11;	6,11;	6,39;	6,61;	6,41;	6,41;	6,38;	6,31;	6,26;	6,11;	6,22;

Значения износов определяются по формулам:

- для валов $I = d_{\min} - d_{изм}$;
- для отверстия $I = D_{изм} - D_{\max}$,

где $d_{изм}$ и $D_{изм}$ – измеренный диаметр соответственно вала и отверстия; d_{\min} и D_{\max} – соответственно наименьший и наибольший размеры вала и отверстия.

Степень изношенности отдельных соединений ($I_{соед}$) определяется по разности зазоров измеренного и начального (чертежного).

$$I_{соед} = S_{изм} - S_{н. \max},$$

где $S_{изм}$ – зазор, полученный при измерении; $S_{н. \max}$ – начальный наибольший зазор по чертежу.

По таблице 3.4 определяем номинальный чертежный размер толщины шлицев (диаметр 50 мм). При этом минимальное значение толщины шлицев d_{\min} равно нижнему предельному размеру по чертежу:

$$d_{\min} = 7,06 - 0,10 = 6,96 \text{ мм.}$$

Тогда износы деталей составят:

$$I_1 = 6,96 - 6,91 = 0,05 \text{ мм}; I_2 = 6,96 - 6,39 = 0,57 \text{ мм};$$

$$I_3 = 6,96 - 6,76 = 0,20 \text{ мм}; I_4 = 6,96 - 6,31 = 0,65 \text{ мм};$$

$$I_5 = 6,96 - 6,61 = 0,35 \text{ мм}; I_6 = 6,96 - 6,51 = 0,45 \text{ мм}.$$

Сводная ведомость (вариационный ряд) исходной информации, в которой полученные расчетом износы расположены в порядке их возрастания, приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Сводная ведомость информации по износам шлицев вала

№ п/п	Износ I , мм	№ п/п	Износ I , мм	№ п/п	Износ I , мм
1	0,05	17	0,56	33	0,71
2	0,05	18	0,56	34	0,71
3	0,20	19	0,57	35	0,72
4	0,20	20	0,57	36	0,73
5	0,20	21	0,58	37	0,73
6	0,35	22	0,58	38	0,73
7	0,35	23	0,59	39	0,74
8	0,35	24	0,65	40	0,74
9	0,35	25	0,65	41	0,85
10	0,45	26	0,65	42	0,85
11	0,45	27	0,65	43	0,85
12	0,45	28	0,65	44	0,85
13	0,45	29	0,65	45	0,85
14	0,55	30	0,65	46	0,85
15	0,55	31	0,70	47	0,95
16	0,55	32	0,70	48	1,05

Составление статистического ряда исходной информации

Статистический ряд информации составляют в виде таблицы, состоящей из пяти строк (таблица 3.6). Вся информацию по износам разбиваем на интервалы, количество которых определяется по формуле:

$$n = \left\lceil \sqrt{N} \right\rceil,$$

где N – количество информации (количество измеренных деталей).

Число интервалов статистического ряда составит:

$$n = \left\lceil \sqrt{48} \right\rceil = 7.$$

Таблица 3.6 – Статистический ряд информации

Интервал, мм	0...0,15	0,15...0,30	0,30...0,45	0,45...0,60	0,60...0,75	0,75...0,90	0,90...1,05
Середина интервала, I_{ci}	0,075	0,225	0,375	0,525	0,675	0,825	0,975
Частота m_i	2	3	6	12	17	6	2
Опытная вероятность P_i	0,04	0,06	0,12	0,24	0,38	0,12	0,04
Накопленная опытная вероятность $\sum_{i=1}^n P_i$	0,04	0,10	0,22	0,46	0,84	0,96	1,00

Длина (протяженность) одного интервала:

$$A = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{n},$$

где I_{\max} и I_{\min} – соответственно наибольшее и наименьшее значения износов (см. таблица 3.5). Тогда,

$$A = \frac{1,05 - 0,05}{7} = 0,143 \approx 0,15 \text{ мм.}$$

Протяженность интервала всегда округляют в большую сторону. Интервалы должны быть одинаковыми по величине и прилегать друг к другу без разрывов. Начало первого интервала или смещение рассеивания показателя надежности (C) определяется по формуле:

$$C = I_1 - 0,5 \cdot A \text{ или } C = I_1 - \frac{I_3 - I_1}{2},$$

где I_1 и I_3 – значение износа соответственно в первой и третьей точках информации, мм. Принимается из таблицы 4.5 ($I_1 = 0,05$ мм, $I_3 = 0,20$ мм).

$$C = 0,05 - 0,5 \cdot 0,15 = -0,025 \text{ мм.}$$

Принимаем $C = 0$, так как отрицательного износа не может быть, т. е. нет сдвига рассеивания.

Число интервалов и их протяженность используется для построения первой строки статистического ряда (см. таблицу 3.6). Вторая строка этого ряда представляет собой середину каждого интервала. Например, для первого интервала $(0 + 0,15) / 2 = 0,075$. Третья строка показывает частоту, т.е. сколько деталей попадает в каждый интервал износов (берут из таблицы 3.5). При этом если на границе двух интервалов окажется несколько деталей с равным износом, то их поровну

распределяют между этими интервалами. Например, в первом интервале (0...0,15 мм) частота $m_1 = 2$; во втором – $m_2 = 3$; в третьем – $m_3 = 6$ (четыре детали с износом 0,35 мм и две детали с износом 0,45 мм, а остальные две детали с износом 0,45 мм переходят в четвертый интервал). Если окажется, что последнее одно или несколько значений износа (точек информации) выходят за пределы последнего интервала, то необходимо либо добавить еще один интервал, либо увеличить протяженность интервалов (A).

Значение опытных вероятностей (или частот) в каждом интервале (четвертая строка статистического ряда) определяют по формуле:

$$P_i = \frac{m_i}{N},$$

где m_i – опытная частота в i -м интервале.

$$P_1 = \frac{2}{48} = 0,04; \quad P_2 = \frac{3}{48} = 0,06; \quad P_3 = \frac{6}{48} = 0,12; \quad P_4 = \frac{12}{48} = 0,24;$$

$$P_5 = \frac{17}{48} = 0,38; \quad P_6 = \frac{6}{48} = 0,12; \quad P_7 = \frac{2}{48} = 0,04.$$

Значения накопленных опытных вероятностей или частот (последняя строка статистического ряда) определяются суммированием вероятностей по интервалам:

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{N}.$$

$$\sum P_1 = 0,04; \quad \sum P_2 = 0,04 + 0,06 = 0,1; \quad \sum P_3 = 0,1 + 0,12 = 0,22 \text{ и т. д.}$$

$$\text{или } \sum P_1 = 0,04; \quad \sum P_2 = (2 + 3) / 50 = 0,1 \text{ и т. д.}$$

Сумма частот по всем интервалам должна быть равна N (т.е. 48), а сумма накопленных опытных вероятностей $\sum P_i = 1,0$.

Определение числовых характеристик. Основными числовыми характеристиками распределения случайной величины являются: среднее значение, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Среднее квадратическое отклонение представляет собой абсолютную меру, а коэффициент вариации – относительную меру рассеяния (разброса) случайной величины. При объеме выборки (информации) $N \geq 25$ их определяют следующим образом:

$$\bar{I} = \sum_i^n I_{ci} \cdot P_i,$$

где I_{ci} – значение износа в середине i -го интервала (середина i -го интервала); P_i – опытная вероятность в i -м интервале.

В нашем примере среднее значение износа:

$$\bar{I} = 0,075 \cdot 0,04 + 0,225 \cdot 0,06 + 0,375 \cdot 0,12 + 0,525 \cdot 0,24 + 0,675 \cdot 0,38 + 0,825 \cdot 0,12 + 0,975 \cdot 0,04 = 0,60 \text{ мм.}$$

Среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\sum_i^n (I_{ci} - \bar{I})^2 \cdot P_i}.$$

В нашем примере:

$$\sigma = \sqrt{(0,075-0,60)^2 \cdot 0,04 + (0,225-0,60)^2 \cdot 0,06 + (0,375-0,60)^2 \cdot 0,12 + (0,525-0,60)^2 \cdot 0,24 + (0,675-0,60)^2 \cdot 0,38 + (0,825-0,60)^2 \cdot 0,12 + (0,975-0,60)^2 \cdot 0,04} = 0,20 \text{ мм.}$$

Коэффициент вариации:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{I} - C} = \frac{0,20}{0,60 - 0} = 0,33.$$

Проверка информации на выпадающие точки. Проверим информацию по износам шлицев валов на наличие выпадающих точек по критерию Ирвина λ , опытное значение которого определяется по формуле:

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{I_i - I_{i-1}}{\sigma},$$

где I_i и I_{i-1} – смежные точки в сводной ведомости информации (см. таблица 3.5).

Для наименьшего значения износа $I_3 = 0,20$; $I_2 = I_1 = 0,05$

$$\lambda_{\text{оп1}} = (0,20 - 0,05) / 0,20 = 0,75.$$

Для наибольшего значения износа $I_{48} = 1,05$; $I_{47} = 0,95$

$$\lambda_{\text{оп2}} = (1,05 - 0,95) / 0,20 = 0,50.$$

Полученные значения $\lambda_{\text{оп}}$ сравнивают с табличными значениями критерия Ирвина. Если $\lambda_{\text{оп}} < \lambda_{\text{т}}$, то информация достоверна, если $\lambda_{\text{оп}} > \lambda_{\text{т}}$, то такие точки «выпадают», т.е. должны быть исключены из информации как недостоверные. В этом случае необходимо перестроить статистический ряд с учетом уменьшения количества информации за счет выпавших точек, вновь рассчитав \bar{I} , σ и V .

В нашем случае при $N = 48$ и доверительной вероятности $\beta = 0,95$ табличное значение критерия Ирвина $\lambda_T = 1,1$ (см. таблицу 11 приложения), что больше $\lambda_{оп}$. Поэтому с вероятностью 0,95 можно утверждать, что все точки информации достоверны.

Графическое построение опытного распределения износов. Используя данные статистического ряда информации (см. таблицу 3.6), строятся графики, наглядно характеризующие опытное распределение случайной величины (в нашем примере износы детали): гистограмма и полигон (рисунок 3.6); кривая накопленных опытных вероятностей (рисунок 3.7 (3)).

При построении опытного распределения случайной величины по оси абсцисс откладывается в произвольно выбранном масштабе значение износа, а по оси ординат – опытная частота m_i или опытная вероятность P_i (см. рисунок 3.6) или накопленная опытная вероятность $\sum P_i$ (см. рисунок 3.6).

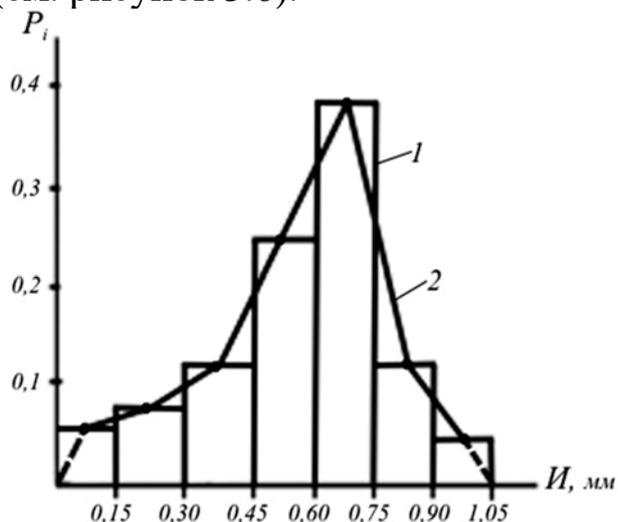


Рисунок 3.6 – Гистограмма (1) и полигон (2) распределения износов шлицев

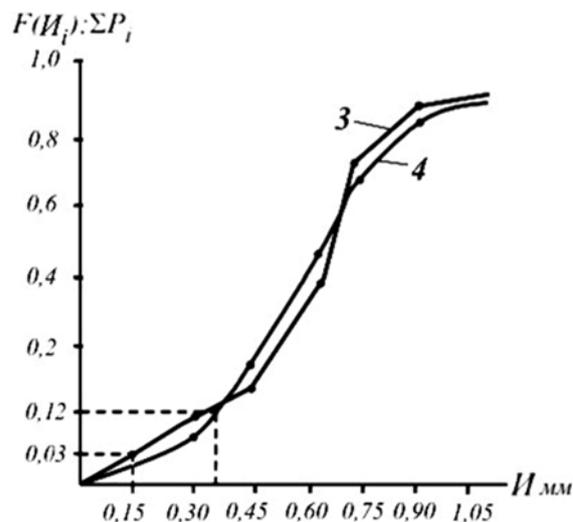


Рисунок 3.7 – Кривая накопленных опытных вероятностей (3) и интегральная функция (4) износов шлицев

Масштаб ординаты следует выбирать, придерживаясь правила «золотого сечения»:

$$Y = \frac{5}{8} X,$$

где Y – длина наибольшей ординаты; X – длина абсциссы, соответствующей наибольшему значению износа.

Гистограмма и полигон являются дифференциальными законами, а кривая накопленных опытных вероятностей – интегральным опытным законом распределения значений износа.

Построение гистограммы осуществляется следующим образом (см. рисунок 3.6 (1)). По оси абсцисс откладывают интервалы в соответствии со статистическим рядом, а по оси ординат – опытную частоту m_i или опытную вероятность P_i в начале и конце каждого интервала. Соединив построенные в каждом интервале точки, получаем прямоугольники. В результате получается ступенчатый многоугольник – гистограмма. Площадь каждого прямоугольника в процентах или долях единицы определяет опытную вероятность или количество деталей, у которых износ находится в данном интервале.

Построение полигона (см. рисунок 3.6 (2)) осуществляется по точкам, образованным пересечением абсциссы, равной середине интервала, и ординаты, равной опытной вероятности интервала или частоте m_i , т.е. необходимо соединить прямыми линиями середины верхних (горизонтальных) сторон прямоугольников гистограммы.

Площадь под кривой полигона в заданном интервале равна в процентах или долях единицы количеству деталей, имеющих износ в границах этого интервала. При этом начальная и конечная точки полигона распределения приравниваются первой и последней точкам информации.

Точки кривой накопленных опытных вероятностей образуются пересечением абсциссы, равной концу данного интервала, и ординаты, равной сумме вероятностей предыдущих интервалов (см. рисунок 3.7 (3)).

По кривой накопленных опытных вероятностей можно определить количество деталей, имеющих допустимый износ. Для этого по оси абсцисс откладывают значение допустимого (предельного) износа и восстанавливают из этой точки перпендикуляр до пересечения с кривой накопленных опытных вероятностей. Значение ординаты (в процентах) при этом и будет соответствовать количеству деталей, имеющих допустимый (предельный) износ.

Выбор теоретического закона распределения для выравнивания опытной информации. Полученные значения износа деталей группы машин (частная совокупность) должны быть перенесены в дальнейшем на генеральную совокупность (детали всех машин, работающих в зоне обслуживания данного ремонтного предприятия), в результате чего оценивается качество ремонта машин, и разрабатываются мероприятия по повышению их долговечности (снижения скорости изнашивания рассматриваемых деталей).

По полученной информации необходимо определить общий теоретический закон распределения износа для генеральной совокупности машин, который выражает общий характер изменения износа и исключает частные отклонения, вызванные разнообразием и непостоянством факторов, влияющих на работу этих машин.

Замена опытного закона распределения износа теоретическим называется в теории вероятностей процессом выравнивания статистической информации. Теоретический закон применим, как к полной совокупности, так и к любой частной совокупности деталей.

Предварительный выбор теоретического закона распределения осуществляется по величине коэффициента вариации. Если $V < 0,3$, то распределение подчиняется ЗНР, если $V > 0,5$ – ЗРВ. Если V лежит в интервале от 0,3 до 0,5, то выбирается тот закон, который лучше совпадает с опытной информацией.

В рассматриваемом примере коэффициент вариации $V = 0,33$, поэтому для выравнивания статистической информации подходит как ЗНР, так и ЗРВ.

Для окончательного решения необходимо рассчитать дифференциальную $f(I_{ci})$ и интегральную $F(I_{ki})$ функции распределения износа деталей по ЗНР и ЗРВ, а затем с помощью критерия согласия выбрать теоретический закон распределения и определить его параметры.

Дифференциальную функцию $f(I_{ci})$ для ЗНР в середине i -го интервала статистического ряда определяют по формуле:

$$f(I_{ci}) = \frac{A}{\sigma} f_0 \left(\frac{I_{ci} - \bar{I}}{\sigma} \right),$$

где A – протяженность интервала, мм ($A = 0,15$ мм); σ – среднее квадратическое отклонение, мм ($\sigma = 0,20$ мм); f_0 – центрированная нормированная функция, значение которой определяется по таблице 3 приложения; I_{ci} – значение износа в середине i -го интервала статистического ряда информации (см. таблицу 3.6); \bar{I} – среднее значение износа, мм ($\bar{I} = 0,60$ мм).

Если значение дифференциальной функции получается отрицательным, то из таблицы 3 приложения необходимо брать положительное значение функции ($f_0(-I) = f_0(+I)$).

Расчет ведется для каждого интервала и полученные значения дифференциальных функций $f(I_{ci})$ для ЗНР записываются по форме таблицы 3.7:

$$f_1(0,075) = \frac{0,15}{0,20} f_0\left(\frac{0,075 - 0,60}{0,20}\right) = 0,75 \cdot f_0(-2,62) = 0,75 \cdot 0,01 = 0,01;$$

$$f_2(0,225) = \frac{0,15}{0,20} f_0\left(\frac{0,225 - 0,60}{0,20}\right) = 0,75 \cdot f_0(-1,88) = 0,75 \cdot 0,07 = 0,05;$$

$$f_3(0,375) = \frac{0,15}{0,20} f_0\left(\frac{0,375 - 0,60}{0,20}\right) = 0,75 \cdot f_0(-1,13) = 0,75 \cdot 0,22 = 0,16;$$

$$f_4(0,525) = \frac{0,15}{0,20} f_0\left(\frac{0,525 - 0,60}{0,20}\right) = 0,75 \cdot f_0(-0,38) = 0,75 \cdot 0,37 = 0,28;$$

$$f_5(0,675) = \frac{0,15}{0,20} f_0\left(\frac{0,675 - 0,60}{0,20}\right) = 0,75 \cdot f_0(0,40) = 0,75 \cdot 0,36 = 0,27;$$

$$f_6(0,825) = \frac{0,15}{0,20} f_0\left(\frac{0,825 - 0,60}{0,20}\right) = 0,75 \cdot f_0(1,12) = 0,75 \cdot 0,21 = 0,15;$$

$$f_7(0,975) = \frac{0,15}{0,20} f_0\left(\frac{0,975 - 0,60}{0,20}\right) = 0,75 \cdot f_0(1,85) = 0,75 \cdot 0,08 = 0,06.$$

Определим значение интегральной функции $F(I_{ki})$ для ЗНР в конце i -го интервала статистического ряда по формуле:

$$F(I_{ki}) = F_0\left(\frac{I_{ki} - \bar{I}}{\sigma}\right),$$

где F_0 – центрированная интегральная функция, значение которой определяется по таблице 4 приложения; I_{ki} – значение износа в конце i -го интервала статистического ряда.

При этом необходимо помнить, что $F_0(-I) = 1 - F_0(+I)$.

В нашем примере конец первого интервала $I_{k1} = 0,15$. Тогда значение $F(I_{k1})$ в первом интервале

$$F_1(0,15) = F_0\left(\frac{0,15 - 0,60}{0,20}\right) = F_0(-2,25) = 1 - F_0(2,25) = 1 - 0,99 = 0,01.$$

Из таблицы 4 приложения находим, что $F_0(2,25) = 0,99$.

Аналогично определяют значение $F(I_{ki})$ и для других интервалов:

$$F_2(0,30) = F_0\left(\frac{0,30 - 0,60}{0,20}\right) = F_0(-1,5) = 1 - F_0(1,5) = 1 - 0,93 = 0,07;$$

$$F_3(0,45) = F_0\left(\frac{0,45 - 0,60}{0,20}\right) = F_0(-0,75) = 1 - F_0(0,75) = 1 - 0,77 = 0,23;$$

$$F_4(0,60) = F_0\left(\frac{0,60 - 0,60}{0,20}\right) = F_0(0) = 0,50;$$

$$F_6(0,90) = F_0\left(\frac{0,90 - 0,60}{0,20}\right) = F_0(1,5) = 0,93;$$

$$F_7(1,05) = F_0\left(\frac{1,05 - 0,60}{0,20}\right) = F_0(2,25) = 0,99.$$

Полученные значения интегральных функций для ЗНР записываются по форме таблицы 3.7.

Таблица 3.7 – Выбор теоретического закона распределения износов шлицев

Интервал, мм		0... 0,15	0,15... 0,30	0,30... 0,45	0,45... 0,60	0,60... 0,75	0,75... 0,90	0,90... 1,05
Середина интервала, I_{ci}		0,075	0,225	0,375	0,525	0,675	0,825	0,975
Конец интервала, I_{ki}		0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05
Накопленная опытная вероятность, ΣP_i		0,04	0,10	0,22	0,46	0,84	0,96	1,00
Закон нормального распределения	$\frac{I_{ci} - \bar{I}}{\sigma}$	-2,62	-1,88	-1,13	-0,38	0,40	1,12	1,85
	$f(I_{ci})$	0,01	0,05	0,16	0,28	0,27	0,15	0,06
	$\frac{I_{ki} - \bar{I}}{\sigma}$	-2,25	-1,5	-0,75	0,00	0,75	1,50	2,25
	$F(I_{ki})$	0,01	0,07	0,23	0,50	0,77	0,93	0,99
	$\left| \sum_i^n P_i - f(I_{ci}) \right|$	0,03	0,05	0,06	0,18	0,57	0,81	0,94
	$\left| \sum_i^n P_i - F(I_{ki}) \right|$	0,03	0,03	0,01	0,04	0,07	0,03	0,01

Продолжение таблицы 3.7

Закон распределения Вейбулла	$\frac{I_{ci} - C}{a}$	0,11	0,33	0,55	0,78	1,00	1,23	1,45
	$f(I_{ci})$	0,01	0,07	0,19	0,28	0,27	0,18	0,07
	$\frac{I_{ki} - C}{a}$	0,22	0,45	0,67	0,89	1,12	1,34	1,56
	$F(I_{ki})$	0,01	0,08	0,23	0,51	0,75	0,92	0,98
	$\left| \sum_i^n P_i - f(I_{ci}) \right|$	0,03	0,03	0,03	0,18	0,57	0,78	0,93
	$\left| \sum_i^n P_i - F(I_{ki}) \right|$	0,03	0,02	0,01	0,05	0,09	0,04	0,02

Дифференциальную функцию $f(I_{ci})$ для ЗРВ в середине i -го интервала статистического ряда определяют по формуле:

$$f(I_{ci}) = \frac{A}{a} f_T \left(\frac{I_{ci} - C}{a} \right),$$

где f_T – табулированное значение дифференциальной функции (принимается по таблице 6 приложения в зависимости от $\frac{I_{ci} - C}{a}$ и b); C – сдвиг начала рассеивания, мм; a – параметр ЗРВ, определяемый по формуле:

$$a = \frac{\bar{I} - C}{K_B},$$

где K_B – коэффициент ЗРВ.

Параметр b и коэффициент K_B определяются по таблице 5 приложения в зависимости от коэффициента вариации V . В нашем примере $\bar{I} = 0,60$, $C = 0$; $V = 0,33$. Из таблицы 5 приложения находим, что при $V = 0,33$, $b = 3,30$, $K_B = 0,90$ и $C_B = 0,30$. Тогда

$$a = \frac{0,60 - 0}{0,90} = 0,67.$$

Расчет $f(I_{ci})$ для ЗРВ ведется также для каждого интервала и полученные данные заносятся в статистический ряд:

$$f_1(0,075) = \frac{0,15}{0,67} f_T \left(\frac{0,075}{0,67} \right) = 0,22 \cdot f_T(0,11) = 0,22 \cdot 0,04 = 0,01;$$

$$f_2(0,225) = \frac{0,15}{0,67} f_T \left(\frac{0,225}{0,67} \right) = 0,22 \cdot f_T(0,33) = 0,22 \cdot 0,31 = 0,07;$$

$$f_3(0,375) = \frac{0,15}{0,67} f_T \left(\frac{0,375}{0,67} \right) = 0,22 \cdot f_T(0,55) = 0,22 \cdot 0,86 = 0,19;$$

$$f_4(0,525) = \frac{0,15}{0,67} f_T \left(\frac{0,525}{0,67} \right) = 0,22 \cdot f_T(0,78) = 0,22 \cdot 1,27 = 0,28;$$

$$f_5(0,675) = \frac{0,15}{0,67} f_T \left(\frac{0,675}{0,67} \right) = 0,22 \cdot f_T(1,00) = 0,22 \cdot 1,22 = 0,27;$$

$$f_6(0,825) = \frac{0,15}{0,67} f_T \left(\frac{0,825}{0,67} \right) = 0,22 \cdot f_T(1,23) = 0,22 \cdot 0,81 = 0,18;$$

$$f_7(0,975) = \frac{0,15}{0,67} f_T \left(\frac{0,975}{0,67} \right) = 0,22 \cdot f_T(1,45) = 0,22 \cdot 0,32 = 0,07.$$

Значение интегральной функции $F(I_{ki})$ для ЗРВ в конце i -го интервала определяется по формуле:

$$F(I_{ki}) = F_T \left(\frac{I_{ki} - C}{a} \right),$$

где F_T – табулированное значение интегральной функции. Принимается по таблице 7 приложения в зависимости от $\frac{I_{ki} - C}{a}$ и b ;

Надо иметь в виду, что если b и $\frac{I_{ki} - C}{a}$ неточно совпадают с данными таблицы 7 приложения, то $F(I_{ki})$ следует определять интерполированием.

Интегральная функция в первом интервале:

$$F_1(0,15) = F_T \left(\frac{0,15 - 0}{0,67} \right) = F_T(0,22) = 0,01.$$

Аналогично определяют $F(I_{ki})$ для остальных интервалов. Полученные значения записывают в таблицу 3.7.

$$F_2(0,30) = F_T \left(\frac{0,30 - 0}{0,67} \right) = F_T(0,45) = 0,08; \quad F_3(0,45) = F_T \left(\frac{0,45 - 0}{0,67} \right) = F_T(0,67) = 0,23;$$

$$F_4(0,60) = F_T \left(\frac{0,60 - 0}{0,67} \right) = F_T(0,89) = 0,51; \quad F_5(0,75) = F_T \left(\frac{0,75 - 0}{0,67} \right) = F_T(1,12) = 0,75;$$

$$F_6(0,90) = F_T\left(\frac{0,90 - 0}{0,67}\right) = F_T(1,34) = 0,92; \quad F_7(1,05) = F_T\left(\frac{1,05 - 0}{0,67}\right) = F_T(1,56) = 0,98.$$

Оценка совпадения опытного и теоретического законов распределения износов по критерию согласия. Окончательный выбор теоретического закона распределения износов выполняется с помощью критериев согласия.

По величине критерия согласия можно определить вероятность совпадения опытных и теоретических законов и на этом основании принять или отбросить выбранный теоретический закон распределения, или обоснованно выбрать один теоретический закон из двух или нескольких. В этом случае наиболее приемлемым окажется тот закон распределения, совпадение которого с опытным распределением характеризуется наименьшим значением расхождения. При этом следует помнить, что критической вероятностью совпадения принято считать $P = 0,1$. Если $P < 0,1$, то выбранный для выравнивания опытной информации теоретический закон распределения следует считать недействительным. Применительно к показателям надежности сельскохозяйственной техники чаще всего используются критерий Колмогорова (λ) и критерий Пирсона (χ^2).

Критерий Колмогорова прост в определении, но дает, как правило, завышенную вероятность совпадения. Однако при выборе одного закона из двух или нескольких, когда важно оценить какой из них лучше выравнивает опытную информацию, можно пользоваться критерием Колмогорова:

$$\lambda_k = D_{\max} \sqrt{N},$$

где D_{\max} – максимальная абсолютная разность между накопленной опытной вероятностью и теоретической интегральной функцией распределения, т.е.

$$D_{\max} = \max \left| \sum_i^n P_i - F(I_{ki}) \right|.$$

Разницу между опытным и теоретическим значениями функций определяют для каждого интервала статистического ряда и заносят в таблицу 3.7, из которой видно, что для ЗНР $D_{\max} = 0,07$, для ЗРВ $D_{\max} = 0,09$. Тогда расчетное значение критерия согласия будет равно:

$$\text{для ЗНР} - \lambda_k = 0,07\sqrt{48} = 0,49;$$

$$\text{для ЗРВ} - \lambda_k = 0,09\sqrt{48} = 0,63.$$

Из таблицы 10 приложения находим вероятность совпадения теоретических законов с опытным распределением:

для ЗНР – $P(\lambda_k) = 0,967$ (с учетом интерполяции);

для ЗРВ – $P(\lambda_k) = 0,818$ (с учетом интерполяции).

Таким образом, по результатам вычислений предварительно можно предположить, что более приемлемым считается закон нормального распределения, у которого значение критерия Колмогорова меньше ($\lambda_k = 0,49$), а вероятность совпадения соответственно больше ($P(\lambda_k) = 0,967$).

Критерий Пирсона дает более точную вероятность совпадения опытного и теоретического законов распределения. Поэтому в рассматриваемом примере окончательный выбор теоретического закона распределения износосов осуществляется с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 , определяемого по формуле:

$$\chi^2 = \sum_1^{n_y} \frac{(m_i - m_{\tau i})^2}{m_{\tau i}}$$

где n_y – число интервалов укрупненного статистического ряда; m_i – опытная частота в i -ом интервале статистического ряда; $m_{\tau i}$ – теоретическая частота в i -ом интервале,

$$m_{\tau i} = N [F(I_{ki}) - F(I_{ni})],$$

[здесь N – количество точек информации; $F(I_{ki})$ и $F(I_{ni})$ – интегральные функции соответственно в конце и в начале i -го интервала статистического ряда].

Для определения χ^2 строят укрупненный статистический ряд с соблюдением следующих условий: $n_y > 4$, $m_i \geq 5$. Анализируя статистический ряд исходной информации (см. таблицу 3.6), можно заметить, что $m_1 = 2$, $m_2 = 3$ и $m_7 = 2$ меньше пяти. Следовательно, первый и второй, а также шестой и седьмой интервалы статистического ряда необходимо объединить. В остальных интервалах статистического ряда опытные частоты больше пяти, поэтому эти интервалы оставляем без изменения (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Укрупненный статистический ряд информации

Интервал, мм	до 0,30	0,30...0,45	0,45...0,60	0,60...0,75	свыше 0,75
Опытная частота m_i	5	6	12	19	8
Теоретическая частота $m_{\tau i}$ при ЗНР	3,5	8,0	13,5	13,5	11,0
Теоретическая частота $m_{\tau i}$ при ЗРВ	4,0	7,5	14,0	12,0	11,5

Теоретические частоты m_{Ti} при законе нормального распределения определяют следующим образом:

$$m_{T1} = 48 [F(0,30) - F(0)] = 48 \cdot (0,07 - 0) = 48 \cdot 0,07 = 3,5;$$

$$m_{T2} = 48 [F(0,45) - F(0,30)] = 48 \cdot (0,23 - 0,07) = 48 \cdot 0,16 = 8,0;$$

$$m_{T3} = 48 [F(0,60) - F(0,45)] = 48 \cdot (0,50 - 0,23) = 48 \cdot 0,27 = 13,5;$$

$$m_{T4} = 48 [F(0,75) - F(0,60)] = 48 \cdot (0,77 - 0,50) = 48 \cdot 0,27 = 13,5;$$

$$m_{T5} = 48 [F(1,05) - F(0,75)] = 48 \cdot (0,99 - 0,77) = 48 \cdot 0,22 = 11,0.$$

При законе распределения Вейбулла

$$m_{T1} = 48 [F(0,30) - F(0)] = 48 \cdot (0,08 - 0) = 48 \cdot 0,08 = 4,0;$$

$$m_{T2} = 48 [F(0,45) - F(0,30)] = 48 \cdot (0,23 - 0,08) = 48 \cdot 0,16 = 7,5;$$

$$m_{T3} = 48 [F(0,60) - F(0,45)] = 48 \cdot (0,51 - 0,23) = 48 \cdot 0,28 = 14,0;$$

$$m_{T4} = 48 [F(0,75) - F(0,60)] = 48 \cdot (0,75 - 0,51) = 48 \cdot 0,24 = 12,0;$$

$$m_{T5} = 48 [F(1,05) - F(0,75)] = 48 \cdot (0,98 - 0,75) = 48 \cdot 0,23 = 11,5.$$

Определим значения критерия согласия Пирсона χ^2 для ЗНР и ЗРВ:

$$\chi_{\text{ЗНР}}^2 = \frac{(5-3,5)^2}{3,5} + \frac{(6-8,0)^2}{8,0} + \frac{(12-13,5)^2}{13,5} + \frac{(19-13,5)^2}{13,5} + \frac{(8-11,0)^2}{11,0} = 4,37;$$

$$\chi_{\text{ЗРВ}}^2 = \frac{(5-4,0)^2}{4,0} + \frac{(6-7,5)^2}{7,5} + \frac{(12-14,0)^2}{14,0} + \frac{(19-12,0)^2}{12,0} + \frac{(8-11,5)^2}{11,5} = 5,98.$$

В соответствии с полученными значениями χ^2 по таблице 13 приложения определяем вероятность совпадения опытных и теоретических распределений. Для входа в таблицу рассчитаем номер строки:

$$N = 5 - 3 = 2.$$

Следовательно, значения критериев χ^2 находим во второй строке таблицы, а вероятность совпадения P – в заглавной строке. Вероятность совпадения ЗНР составляет около 12 %, а ЗРВ – менее 10 %.

Определение доверительных границ рассеивания одиночного и среднего значений износа шлицев. В результате измерения износов 48 деталей и их обработки определили, что среднее значение $\bar{l} = 0,60$ мм. Если же выполнить ту же работу для той же детали, но работавшей в других условиях (например, другой зоне), то окажется, что среднее значение износа будет отличаться от полученного. Таким образом, изменение условий эксплуатации и количества машин, за которыми ведется наблюдение, вызовет изменение количественных характеристик показателя надежности. Хотя эти изменения носят в основном

случайный характер, они проходят в определенных границах или в определенном интервале.

Доверительные границы рассеивания одиночного показателя надежности при ЗНР определяют по уравнениям:

$$I_{\beta}^H = \bar{I} - \tau_{\beta} \sigma; \quad I_{\beta}^B = \bar{I} + \tau_{\beta} \sigma;$$

где I_{β}^H , I_{β}^B – соответственно нижняя и верхняя доверительные границы рассеивания одиночного значения износа при доверительной вероятности β ; \bar{I} – среднее значение показателя надежности; τ_{β} – коэффициент Стьюдента, который определяется в зависимости от N и выбранной доверительной вероятности β .

Определим доверительные границы рассеивания одиночного показателя надежности. Задавшись доверительной вероятностью $\beta = 0,95$ при $N = 48$, по таблице 9 приложения находим значение коэффициента Стьюдента $\tau_{\beta} = 2,01$.

Тогда нижняя и верхняя доверительные границы одиночного значения износа шлицев вала составят:

$$I_{\beta}^H = 0,60 - 2,01 \cdot 0,20 = 0,20 \text{ мм};$$

$$I_{\beta}^B = 0,60 + 2,01 \cdot 0,20 = 1,00 \text{ мм}.$$

Для ЗНР доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяют по формулам:

$$\bar{I}_{\beta}^H = \bar{I} - \tau_{\beta} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad \bar{I}_{\beta}^B = \bar{I} + \tau_{\beta} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

где \bar{I}_{β}^H , \bar{I}_{β}^B – соответственно нижняя и верхняя доверительные границы рассеивания среднего значения износа при доверительной вероятности β .

Тогда нижняя доверительная граница среднего значения износа:

$$\bar{I}_{\beta}^H = 0,60 - 2,01 \frac{0,20}{\sqrt{48}} = 0,54 \text{ мм},$$

верхняя доверительная граница среднего значения износа:

$$\bar{I}_{\beta}^B = 0,60 + 2,01 \frac{0,20}{\sqrt{48}} = 0,66 \text{ мм}.$$

Таким образом, с вероятностью 0,95 можно утверждать, что одиночное значение износа шлицев вала будет находиться в интервале от 0,20 до 1,00 мм, а среднее значение – в интервале от 0,54 до 0,66 мм.

Определение относительной ошибки расчета. Относительная предельная ошибка расчета характеристик износа:

$$\delta_p = \frac{\bar{I}_p^B - \bar{I}}{\bar{I}} \cdot 100 = \frac{(0,66 - 0,60)}{0,60} \cdot 100\% = 10\%.$$

Точность расчетов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\delta_p \leq 20\%$.

Пример графического оформления результатов представлен на рисунке 3.8.

Определение количества деталей, годных без ремонта и подлежащих восстановлению. Для определения количества годных деталей рассчитывают допустимые без ремонта износы детали в соединении ее с деталями, бывшими в эксплуатации, и новыми по формулам:

- для валов $I_{дБ} = d_{\min} - d_{дБ}$; $I_{дН} = d_{\min} - d_{дН}$;
- для отверстий $I_{дБ} = D_{дБ} - D_{\max}$; $I_{дН} = D_{дН} - D_{\max}$,

где d_{\min} , D_{\max} – соответственно наименьший и наибольший предельные размеры вала и отверстия; $d_{дБ}$, $d_{дН}$ – допустимые без ремонта размеры вала в соединении соответственно с деталями, бывшими в эксплуатации, и с новыми; $D_{дБ}$, $D_{дН}$ – допустимые без ремонта размеры отверстий в соединении соответственно с деталями, бывшими в эксплуатации, и с новыми.

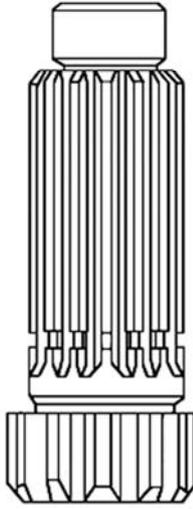
В исходных данных к примеру указано (см. таблицу 3.4), что в соответствии с техническими требованиями на капитальный ремонт шасси трактора допустимый размер шлицев при соединении с деталями, бывшими в эксплуатации, составляет 6,80 мм, а с новыми – 6,61 мм. Тогда в нашем примере при $d_{\min} = 6,96$ мм получим:

$$I_{дБ} = 6,96 - 6,80 = 0,16 \text{ мм};$$
$$I_{дН} = 6,96 - 6,61 = 0,35 \text{ мм}.$$

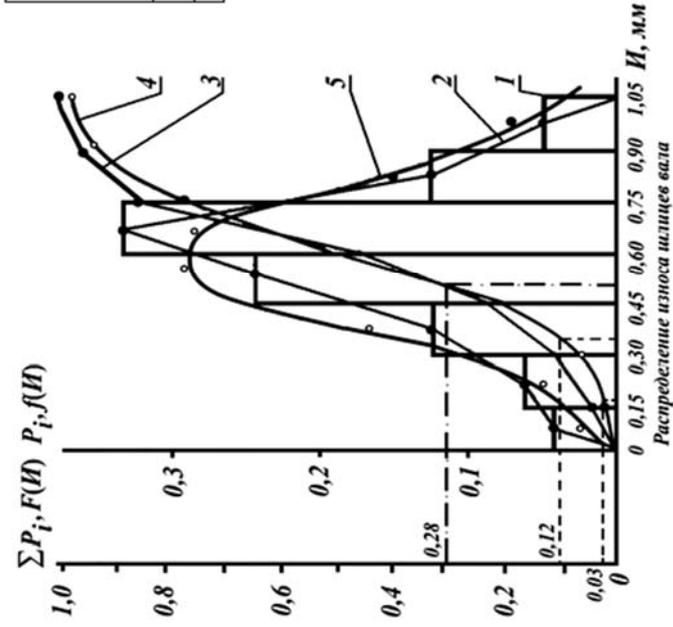
Значения допустимых износов откладывают по оси абсцисс (см. рисунки 3.7 и 3.8) и из этих точек восстанавливают перпендикуляры до пересечения с теоретической интегральной кривой распределения износов. Из точек пересечения проводят горизонтальные линии до оси ординат и отсчитывают в процентах количество годных деталей и деталей, требующих восстановления.

В нашем примере общее количество деталей, годных без ремонта, равно 12 %, из них 3 % можно соединять как с новыми, так и с бывшими эксплуатации деталями, а 9 % – только с новыми деталями. У 88 % деталей шлицы необходимо восстанавливать. Таким образом, коэффициент годности первичного вала по шлицам равен 0,12, а коэффициент восстановления – 0,88.

Интервал, мм	0,00...0,15	0,15...0,30	0,30...0,45	0,45...0,60	0,60...0,75	0,75...0,90	0,90...1,05
Частота m_i	2	3	6	12	17	6	2
Опытная вероятность P_i	0,04	0,06	0,12	0,24	0,38	0,12	0,04
Накопл. опытн. вероятность ΣP_i	0,04	0,10	0,22	0,46	0,84	0,96	1,00
ЗНР	$f(I_{ci})$	0,01	0,05	0,16	0,28	0,27	0,15
	$F(I_{ci})$	0,01	0,07	0,23	0,50	0,77	0,93
ЗРВ	$f(I_{ki})$	0,01	0,07	0,19	0,28	0,27	0,18
	$F(I_{ki})$	0,01	0,08	0,23	0,51	0,75	0,92



Интервал, мм	0,00...0,03	0,03...0,06	0,06...0,09	0,09...0,12	0,12...0,15	0,15...0,18	0,18...0,21
Частота m_i	2	14	10	9	8	5	2
Опытная вероятность P_i	0,04	0,28	0,20	0,18	0,16	0,10	0,04
Накопл. опытн. вероятность ΣP_i	0,04	0,32	0,52	0,70	0,86	0,96	1,00
ЗНР	$f(I_{ci})$	0,05	0,24	0,22	0,20	0,16	0,08
	$F(I_{ci})$	0,06	0,30	0,52	0,72	0,88	0,96
ЗРВ	$f(I_{ki})$	0,06	0,28	0,22	0,16	0,12	0,08
	$F(I_{ki})$	0,06	0,34	0,56	0,72	0,84	0,92



№ позиции	Контролируемые дефекты	Размеры, мм	допускаемые в сопряжении с деталями	
			чертежн.	обычными в новыми эксплуатаци.
1	Износ шлицев	$7,06^{+0,08}_{-0,10}$	6,80	6,61
6	Износ шейки	$40_{-0,08}$	39,99	39,97

ТЗР	ЗНР
\bar{I}	0,60 мм
σ	0,20 мм
C	0,00 мм
V	0,33
I_{β}^k	0,20 мм
I_{β}^b	1,00 мм
\bar{I}_{β}^k	0,54 мм
\bar{I}_{β}^b	0,66 мм
δ_{β}	12 %

ТЗР	ЗРВ
\bar{I}	0,08 мм
a	0,09 мм
b	2,0
C	0,04 мм
V	0,50
I_{β}^k	0,02 мм
I_{β}^b	0,15 мм
\bar{I}_{β}^k	0,07 мм
\bar{I}_{β}^b	0,09 мм
δ_{β}	8 %

Рисунок 3.8 – Пример графического оформления результатов расчетов:

1 – гистограмма; 2 – полигон распределения; 3 – дифференциальная функция распределения; 4 – кривая накопленных опытных вероятностей; 5 – интегральная функция распределения

3.4. Графические методы обработки информации по показателям надежности

Недостатком аналитических методов обработки информации является значительная трудоемкость расчетных работ. К достоинствам графических методов обработки информации относится возможность обработки всех видов информации: полной, усеченной и многократно усеченной.

Кривая накопленных опытных вероятностей или интегральная кривая теоретического закона распределения носит естественно криволинейный характер. По внешнему виду этой кривой трудно определить, какому закону подчиняется рассеивание показателя надежности, и невозможно определить параметры этого закона. Кроме того, в случае усеченной информации и известного закона распределения на такой график удастся нанести только лишь начальные точки информации.

Функциональную сетку графика составляют так, чтобы нанесенная на него интегральная функция распределения была представлена прямой линией (интегральная прямая).

Для выпрямления интегральной кривой используют два метода. При первом методе значения функции по оси ординат, например, 0,01; 0,05; 0,10; 0,20 и т. д. наносят не на равных расстояниях одно относительно другого, а пропорционально указанным квантилям.

При втором методе для выпрямления кривой функции распределения применяют логарифмическую ось координат.

Методика обработки информации графическим методом при законе нормального распределения. Выпрямление кривой функции распределения отказности при ЗНР выполняют первым методом. Для получения расчетных формул рассмотрим график центрированной и нормированной интегральной функции (рисунок 3.9). При этом минимальное значение функции примем $F_0(t) = 0,01$, максимальное $F_0(t) = 0,99$, так как при 0 и 1 значения функции уходят в $\pm \infty$. Нанесем эти точки на ось ординат. В таблице 15 приложения значения квантилей приведены для функций от 0,5 до 0,99, так как верхняя часть этой таблицы – зеркальное отображение ее нижней части. Квантиль $H_k(0,5) = 0$. Для симметрично расположенных относительно $F(t) = 0,5$ точки на оси ординат квантили равны между собой. Так, квантили $H_k(0,4) = H_k(0,6) = 0,253$, $H_k(0,01) = H_k(0,99) = 2,326 \approx 2,33$.

Для определения положения точки t_i на оси абсцисс необходимо из отрезка 2,33 вычесть или прибавить (в зависимости от положения точки относительно $H_k(0,5) = 0$) квантиль интегральной функции или

накопленной опытной вероятности $\sum_1^i P_i$, соответствующий этой точке. Тогда координату точки по оси ординат, мм, находят так:

$$y_i = 50 \left[2,33 \pm H_k \left(\sum_1^i P_i \right) \right], \quad (3.42)$$

где 50 – масштаб построения оси ординат, мм/квантиль; $\sum_1^i P_i$ – накопленная опытная вероятность i -го отказавшего объекта.

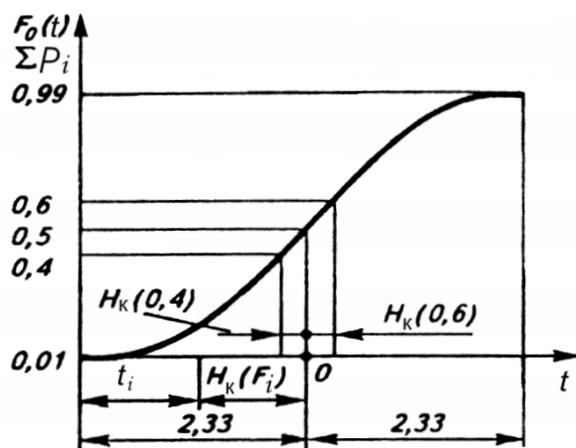


Рисунок 3.9 – Схема определения координаты y_i при законе нормального распределения

При $\sum_1^i P_i < 0,5 H_k \left(\sum_1^i P_i \right)$ принимают с минусом, а при $\sum_1^i P_i > 0,5 H_k \left(\sum_1^i P_i \right)$ – с плюсом.

Накопленная опытная вероятность:

$$\sum_1^i P_i = \frac{N_i^0}{N+1}, \quad (3.43)$$

где N_i^0 – порядковый номер i -й точки в таблице исходной информации; N – общее число точек в информации.

Координату точки по оси абсцисс (мм) определяют по уравнению:

$$x_i = M_x t_i, \quad (3.44)$$

где $M_x = 0,05$ – масштаб оси абсцисс, мм/мото-ч; t_i – значение i -го показателя надежности.

Определив y_i и x_i для 6...7 точек, равномерно расположенных в таблице исходной информации, наносят эти точки на график с прямоугольными координатами (рисунок 3.10). Не рекомендуется за расчетные точки принимать первые и последние точки информации, так как они могут быть выпадающими. Обычно за первую расчетную точку принимают точку, накопленная опытная вероятность которой $\sum_1^i P_i = 0,10...0,15$; за последнюю — $\sum_1^i P_i = 0,85...0,95$.

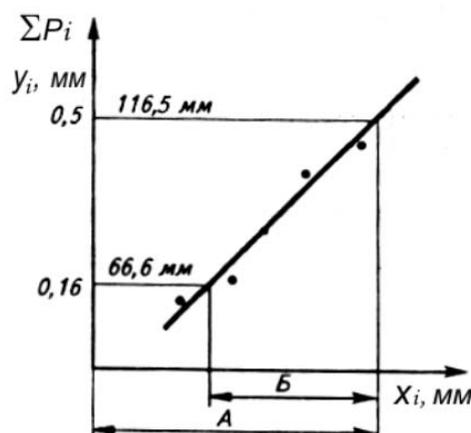


Рисунок 3.10 – Схема определения \bar{t} и σ по интегральной прямой отказности закона нормального распределения

Через опытные точки проводят прямую линию с таким расчетом, чтобы с каждой ее стороны располагалось одинаковое число точек, а их расстояния от прямой были примерно одинаковыми. Через точку на оси ординат $\sum_1^i P_i = 0,5$ (находится на расстоянии 116,5 мм от начала координат) проводят горизонтальную линию до пересечения с интегральной прямой. Из точки пересечения на ось абсцисс опускают перпендикуляр. Отрезок A на оси абсцисс соответствует в заданном масштабе среднему значению показателя надежности $\bar{t} = A$, мм / M_x .

Среднее квадратическое отклонение σ определяют графическим методом на основании уравнения:

$$\sigma = (\bar{t} - t_i) / H_k(F_i). \quad (3.45)$$

При $H_k(F_i) = 1,0$ $\sigma = (\bar{t} - t_i)$. Из таблицы 15 приложения находим $H_k(F_i) \approx 1,0$ при $F_i = 0,16$ или $F_i = 0,84$. Следовательно, значение σ равно длине отрезка B (разность абсциссы A и абсциссы точки пересечения горизонтали $\sum_1^i P_i = 0,16$, проведенной на расстоянии 66,6 мм от начала координат). Среднее квадратическое отклонение $\sigma = B$, мм / M_x .

Пример 3.1. Определить средний доремонтный ресурс двигателя и среднее квадратическое отклонение, если во время испытаний до наработки каждого двигателя 4200 ч из общего количества $N = 69$ отказали $N_0 = 36$ двигателей.

Решение. Решение осуществляется в следующей последовательности.

1. Составляют сводную таблицу ресурсов $T_{др}$ отказавших двигателей в порядке их возрастания (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Информация о доремонтных ресурсах двигателя $T_{др}$ (мото-ч)

Номер отказавшего двигателя	$T_{др}$	Номер отказавшего двигателя	$T_{др}$	Номер отказавшего двигателя	$T_{др}$
1	1600	7	3060	...	...
2	2100	8	3060	24	3700
3	2100	...	...	...	...
4	2720	12	3210	30	3970
5	2900	...	...	...	...
6	2900	18	3420	36	4180

2. Выбирают из сводной таблицы информации шесть равномерно расположенных точек: 6, 12, 18, 24, 30 и 36.

3. Определяют координату выбранных точек x_i , приняв масштаб $M_x = 0,05$ мм/ч. Например, координата x_i для шестого двигателя:

$$x_6 = 0,05 \cdot 2900 = 145 \text{ мм.}$$

4. Определяют накопленные опытные вероятности выбранных двигателей. Например, накопленная опытная вероятность шестого двигателя:

$$\sum_1^6 P_6 = 6 / (69 + 1) = 0,09.$$

5. Находят координату выбранных точек y_i по уравнению (3.42) или по таблице 16 приложения. Например, координата y_i для шестого двигателя

$$y_6 = 50 [2,33 - H_k(0,09)] = 50 [2,33 - 1,34] = 49,3 \text{ мм.}$$

Квантиль $H_k(0,09)$ определяют по таблице 15 приложения. Выполненные расчеты сводят в таблицу 3.10.

6. Наносят опытные точки на график с прямоугольными координатами (рисунок 3.11) и проводят по ним интегральную прямую.

Таблица 3.10 – Координаты опытных точек при ЗНР

Порядковый номер отказавшего двигателя N_i^0	$T_{др}, \text{ч}$	$x_i, \text{мм}$	$\sum_1^i P_i$	$y_i, \text{мм}$
6	2900	145	0,09	49,3
12	3210	160,5	0,17	68,6
18	3420	171	0,26	84,1
24	3700	185	0,34	95,7
30	3970	198,5	0,43	107,5
36	4180	209	0,52	118,8

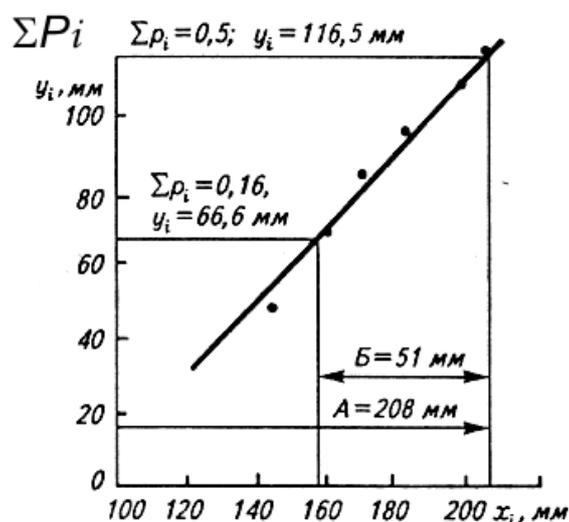


Рисунок 3.11 – Графическая часть обработки усеченной информации по закону нормального распределения

7. Рассчитывают средний доремонтный ресурс и среднее квадратическое отклонение:

$$\bar{T}_{др} = 208 / 0,05 = 4160 \text{ ч};$$

$$\sigma = 51 / 0,05 = 1020 \text{ ч}.$$

Ответ: $\bar{T}_{др} = 4160 \text{ ч}, \sigma = 1020 \text{ ч}.$

Методика обработки информации графическим методом при законе распределения Вейбулла. Интегральную кривую отказности закона распределения Вейбулла выпрямляют в интегральную прямую посредством логарифмических осей координат. Координаты опытных точек (мм) определяют по следующим уравнениям:

$$x_i = M_x \lg(t_i - C); \tag{3.46}$$

$$y_i = M_y \left[2,37 + \lg \lg \frac{1}{1 - \sum_1^i P_i} \right], \quad (3.47)$$

где M_x и M_y – масштабы построения осей абсцисс и ординат; t_i – значение показателя надежности; C – смещение начала рассеивания показателя надежности; $\sum_1^i P_i$ – накопленная опытная вероятность.

Уравнение (3.47) получено двойным логарифмированием интегральной функции отказности закона распределения Вейбулла

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

Накопленную опытную вероятность находят по уравнению

$$\sum_1^i P_i = N_i^0 / (N + 1). \quad (3.48)$$

На график с прямоугольными осями координат (рис.3.12) наносят опытные точки, по которым проводят интегральную прямую. Через точку оси ординат, соответствующей $\sum_1^i P_i = 0,63$ (находится на расстоянии 100,3 мм от начала координат), проводят горизонталь до пересечения с интегральной прямой. Точку пересечения проектируют на ось абсцисс. Отрезок x_a соответствует параметру a закона распределения Вейбулла.

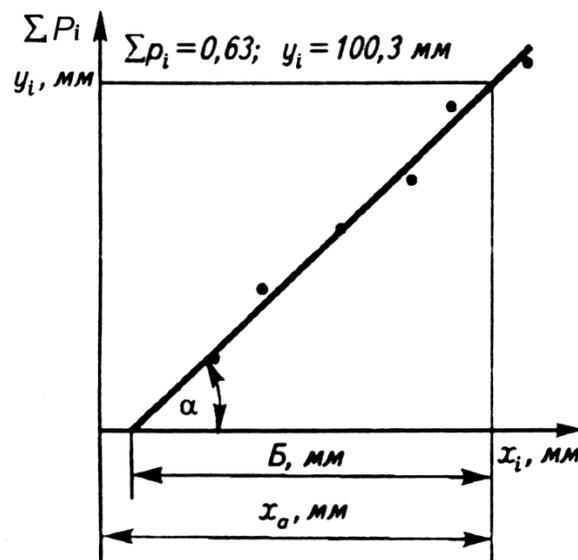


Рисунок 3.12 – Схема определения параметров a и b закона Вейбулла

Горизонталь проводят через $\sum_1^i P_i = 0,63$, потому что $F(t)$, или $\sum_1^i P_i = 0,63$ при $(t_i - C) / a = 1$. Отсюда можно заключить, что при этом условии $t_i - C = a$.

Параметр a находят по длине отрезка x_a , используя уравнение:

$$a = \text{анти lg} \frac{x_a}{100}. \quad (3.49)$$

Далее интегральную прямую продляют до пересечения с осью абсцисс и получают отрезок B , по длине которого вычисляют параметр b .

Параметр b можно определить как

$$\text{tg} \alpha = b = \frac{100,3 \cdot 2}{B} \approx \frac{200}{B}. \quad (3.50)$$

Катет 100,3 мм умножаем на 2 для приведения катетов треугольника к одному масштабу.

Среднее значение показателя надежности и среднее квадратическое отклонение вычисляют по уравнениям

$$\bar{t} = a \cdot K_B + C; \quad (3.51)$$

$$\sigma = a \cdot C_B, \quad (3.52)$$

где K_B и C_B – коэффициенты, определяемые по таблице 5 приложения и значению b .

Пример 3.2. Определить средний доремонтный ресурс двигателя и среднее квадратическое отклонение по информации, представленной в таблице 3.9, если предположить, что рассеивание ресурса подчиняется закону распределения Вейбулла.

Решение. Решение осуществляется в следующей последовательности.

1. Находят смещение рассеивания ресурса по уравнению:

$$C = T_{\text{др1}} - \frac{T_{\text{др3}} - T_{\text{др1}}}{2} = 1600 - (2100 - 1600) : 2 = 1350 \text{ ч.}$$

2. Из сводной таблицы информации выбирают шесть равномерно расположенных точек: 6, 12, 18, 24, 30 и 36.

3. Определяют координату выбранных точек x_i по уравнению (3.46). Например, для шестого двигателя

$$x_6 = 100 \lg (2900 - 1350) \text{ ч} = 100 \lg 1550 \text{ ч.}$$

Для удобства построения графика примем за единицу измерения ресурса 1000 ч. Тогда

$$x_6 = 100 \lg 1,55 \text{ тыс. ч} = 19,03 \text{ мм.}$$

4. Рассчитывают накопленные опытные вероятности по уравнению (3.48). Например, накопленная опытная вероятность шестого двигателя

$$\sum_1^6 P_6 = 6 / (69 + 1) = 0,09.$$

5. Находят координату выбранных точек y_i по уравнению (3.47). Например, координата шестого двигателя

$$y_6 = 50 \left(2,37 + \lg \lg \frac{1}{1 - 0,09} \right) = 50(2,37 + \lg \lg 1,10) = 50(2,37 - 1,376) \text{ мм} = 49,7 \text{ мм.}$$

Координату y_i можно определить также по таблице 17 приложения. Выполненные расчеты по всем опытным точкам сводят в таблицу 3.11.

Таблица 3.11 – Координаты опытных точек при ЗРВ

Порядковый номер отказавшего двигателя N_i^0	Доремонтный ресурс $T_{др}$, ч	x_i , мм	$\sum_1^i P_i$	y_i , мм
6	2900	19,03	0,09	49,7
12	3210	27,0	0,17	64,0
18	3420	31,6	0,26	74,3
24	3700	37,1	0,34	81,3
30	3970	41,8	0,43	87,9
36	4180	45,2	0,52	93,7

6. Наносят опытные точки на график с прямоугольными координатами и проводят по ним интегральную прямую (рисунок 3.13).

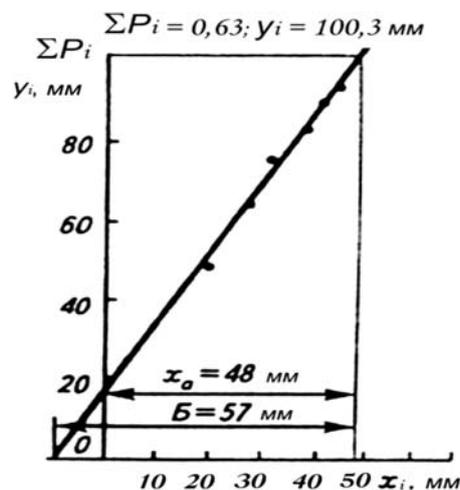


Рисунок 3.13 – Графическая часть обработки усеченной информации по закону распределения Вейбулла

7. По длине отрезка $x_a = 48$ мм и формуле (3.49) определяют:

$$a = \text{анти} \lg \frac{48}{100} = 3020 \text{ ч.}$$

8. По длине отрезка $B = 57$ мм и формуле (3.50) находят:

$$b = 200 / 57 = 3,5.$$

9. По значению b и таблице 5 приложения определяют коэффициенты $K_b = 0,90$ и $C_b = 0,29$.

10. По формулам (3.51) и (3.52) вычисляют:

$$\bar{T}_{др} = 3020 \cdot 0,90 + 1350 = 4070 \text{ ч;}$$

$$\sigma = 3020 \cdot 0,29 = 876 \text{ ч.}$$

Ответ: $\bar{T}_{др} = 4070$ ч; $\sigma = 876$ ч.

3.5. Методика обработки многократно усеченной информации

Особенность данной методики можно показать на простом примере. Предположим, что испытывали пять машин. Четыре машины отказали при наработках 1000, 2000, 2500 и 3000 ч, а одна машина выбыла с испытаний при наработке 1500 ч в работоспособном состоянии (приостановленная машина). Как в этом случае рассчитать средний ресурс машины?

Наиболее просто средний ресурс можно определить как среднеарифметическую величину без учета и с учетом наработки приостановленной машины:

$$\bar{T} = (1000 + 2000 + 2500 + 3000) : 4 = 2125 \text{ ч;}$$

$$\bar{T} = (1000 + 1500 + 2000 + 2500 + 3000) : 5 = 2000 \text{ ч.}$$

Однако оба эти расчета неправомерны, так как в первом случае не принимают в расчет приостановленную машину, а во втором случае ее зачисляют в разряд отказавших, хотя это не соответствует действительности.

Более точно средний ресурс можно рассчитать с учетом вероятности отказа приостановленной машины, если предположить, что она продолжала бы работать после наработки в момент выбытия с испытаний.

Изображают пять испытываемых машин в виде прямоугольников (рисунок 3.14). Если бы приостановленная машина продолжала работать, то она с равной вероятностью могла бы отказаться во 2, 3, 4 или 5-м интервале, кроме 1-го. Вероятность отказа в каждом из этих интервалов

$$P_i = \frac{1}{n-1} = \frac{1}{5-1} = 0,25,$$

где n – число интервалов наработки.

Вместо номеров фактически отказавших машин N_0 введем понятие порядковых номеров отказавших машин N_i^0 , которые учитывают не только фактически отказавшие машины, но и вероятность отказа приостановленных машин, если бы они имели возможность продолжать работать. Тогда отказавшие машины будут иметь следующие порядковые номера: 1 – 1,00; 2 – 2,25; 3 – 3,50; 4 – 4,75.

Номер машины	1	2	3	4	5
Наработка, ч	1000	1500	2000	2500	3000
Номер интервала наработки j	1	2	3	4	5
Номер отказавшей N_0 -й или приостановленной $N_{пр}$ -й машины	N_01	$N_{пр}1$	N_02	N_03	N_04
Вероятность отказа приостановленной машины в j -м интервале наработки P_i	—	0,25	0,25	0,25	0,25
Порядковый номер отказавшей машины N_i^0	1,00	—	2,25	3,50	4,75

Рисунок 3.14 – Схема расчета порядковых номеров отказавших машин

На основании подобных рассуждений получено аналитическое уравнение для расчета порядковых номеров отказавших машин:

$$N_i^0 = N_{i-1}^0 + \frac{N+1 - N_{(i-1)}^0}{N+1 - N_0 - N_{пр}}, \quad (3.53)$$

где N_i^0 и $N_{(i-1)}^0$ – порядковый номер i -й и предыдущей отказавшей машины; N – общее число испытываемых машин; N_0 и $N_{пр}$ – число отказавших и приостановленных машин до отказа i -й машины.

Применительно к рассмотренному ранее примеру с пятью испытываемыми машинами порядковые номера отказавших машин согласно уравнению (3.53) следующие:

$$N_1^0 = 0 + \frac{5+1-0}{5+1-0-0} = 1,0; \quad N_2^0 = 1,0 + \frac{5+1-1}{5+1-1-1} = 2,25;$$

$$N_3^o = 2,25 + \frac{5+1-2,25}{5+1-2-1} = 3,5; \quad N_4^o = 3,5 + \frac{5+1-3,5}{5+1-3-1} = 4,75.$$

Так, с помощью формулы (3.53) получают те же порядковые номера отказавших машин, как и при логическом рассуждении.

Дальнейшую обработку многократно усеченной информации проводят графическим методом с использованием закона нормального распределения или закона Вейбулла.

Пример 3.3. Определить средний межремонтный ресурс 10 тракторов К-744 и среднее квадратическое отклонение его рассеивания, если наблюдения за этими тракторами проведены в течении $T = 3500$ ч. Информация о результатах наблюдений за тракторами приведена в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Информация по межремонтным ресурсам тракторов К-744

Номер трактора	Номер отказавшего трактора или приостановленного	Ресурс или наработка до конца наблюдений, ч
1	N_{o1}	1550
2	N_{o2}	1800
3	N_{o3}	2050
4	N_{pp1}	2250
5	N_{o4}	2400
6	N_{pp2}	2900
7	N_{pp3}	2950
8	N_{o5}	3000
9	N_{o6}	3250
10	N_{pp4}	3500

Решение. Решение осуществляется в следующей последовательности.

1. Находят порядковые номера отказавших машин по уравнению (3.53):

$$N_1^o = 0 + \frac{10+1-0}{10+1-0-0} = 1,0;$$

$$N_2^o = 1,0 + \frac{10+1-1}{10+1-1-0} = 2,0;$$

$$N_3^o = 2,0 + \frac{10+1-2}{10+1-2-0} = 3,0;$$

$$N_4^o = 3 + \frac{10+1-3}{10+1-3-1} = 4,14;$$

$$N_5^o = 4,14 + \frac{10+1-4,14}{10+1-4-3} = 5,85;$$

$$N_6^o = 5,85 + \frac{10+1-5,85}{10+1-5-3} = 7,56.$$

2. Рассчитывают накопленные опытные вероятности по уравнению (3.48). Например:

$$\text{для первого трактора } \sum_1^1 P_1 = \frac{1}{10+1} = 0,09,$$

для второго трактора $\sum_1^2 P_2 = \frac{2}{10+1} = 0,18$ и т. д.

3. Определяют координаты опытных точек для закона нормального распределения по уравнениям (3.42 и 3.44) и для закона Вейбулла по уравнениям (3.46 и 3.47) Для нахождения y_i используют таблицы 16 и 17 приложения. Проведенные расчеты по всем тракторам сводят в таблицу 3.13.

4. Наносят опытные точки на график с прямоугольными осями координат (рисунок 3.15) и проводят по ним интегральные прямые ЗНР и ЗРВ. При визуальном сравнении совпадения опытных точек с интегральными прямыми можно в данном случае выбрать для дальнейших расчетов ЗРВ, так как его интегральная прямая лучше совпадает с опытными точками исходной информации по межремонтным ресурсам тракторов К-744.

Таблица 3.13 – Координаты опытных точек по межремонтным ресурсам тракторов К-744

Порядковый номер отказавшего трактора N_i^o	Межремонтный ресурс, ч	$\sum_1^i P_i$	ЗНР		ЗРВ	
			x_i , мм	y_i , мм	x_i , мм	y_i , мм
1	1550	0,09	77,5	49,3	40,0	49,1
2	1800	0,18	90,0	70,5	70,0	65,3
3	2050	0,27	102,5	85,6	87,5	75,3
4,14	2400	0,38	120,0	101,0	104,0	84,4
5,85	3000	0,53	150,0	120,1	123,0	94,3
7,56	3250	0,69	162,5	141,1	129,0	103,8

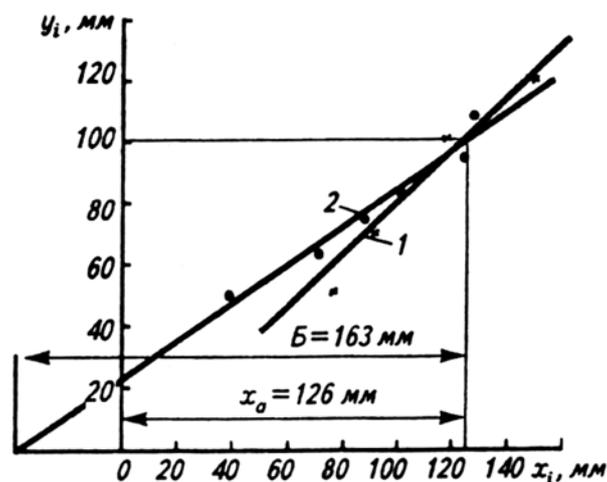


Рисунок 3.15 – Графическая часть обработки многократноусеченной информации:

- 1 – интегральная прямая отказов для закона нормального распределения;
- 2 – интегральная прямая отказов для закона распределения Вейбулла

5. Определяют параметры ЗРВ по уравнениям (3.49 и 3.50):

$$a = \text{анти}g \frac{126}{100} = 1820 \text{ ч};$$

$$b = \frac{200}{163} = 1,23.$$

По значениям параметров b и таблице 5 приложения определяют коэффициенты $K_B = 0,94$ и $C_B = 0,77$.

6. Находят смещение, средний межремонтный ресурс и среднее квадратическое отклонение по уравнениям (3.51 и 3.52):

$$C = 1500 - \frac{2050 - 1550}{2} = 1300 \text{ ч};$$

$$\bar{t} = 1820 \cdot 0,94 + 1300 = 3010 \text{ ч};$$

$$\sigma = 1820 \cdot 0,77 = 1401 \text{ ч}.$$

Ответ: $\bar{t} = 3010 \text{ ч}; \sigma = 1401 \text{ ч}.$

3.6. Определение остаточного ресурса элемента при прогнозировании по реализации изменения параметра

Техническое состояние работающих деталей, механизмов, систем и агрегатов машин в процессе эксплуатации непрерывно изменяется. Степень изменения оценивается по величине параметра, также постепенно изменяющегося и характеризующего в любой момент времени запас работоспособности этого элемента. Различают структурные и диагностические параметры. Параметры, непосредственно характеризующие работоспособность элемента (износ, размер детали, зазор в соединениях, мощность, производительность и др.), называются *структурными*. Параметры, характеризующие работоспособность элемента косвенно (температура, шум, вибрация, расход топлива и гидравлического масла, прорыв газов в картер двигателя и др.), называются *диагностическими*.

В начальный период эксплуатации машины параметры технического состояния элементов имеют исходные номинальные значения. С ростом наработки машины постепенное изменение параметра приводит (в определенный момент) к утрате работоспособности элемента, когда он либо вообще не может выполнять свои функции (разрушение детали, ударные нагрузки, стуки в соединениях и др.), либо не может выполнять их с характеристиками, установленными в технической документации (предельное снижение производительности насоса, эконо-

мичных и мощностных показателей машины и др.). Нарушение работоспособности элемента в результате непрерывного изменения параметра его состояния называется *постепенным отказом*, а значение параметра, при котором происходит внезапный отказ, как уже отмечалось, называют *предельным*.

Технический ресурс изделия – наработка от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние, установленное нормативной документацией. *Наработка* – продолжительность или объем работы изделия в любой момент времени, измеряемый в часах, мото-часах, километрах пробега и других единицах. В соответствии с приведенным определением *остаточный ресурс* изделия – это его наработка от момента контроля параметра технического состояния до его предельного значения.

В целях прогнозирования остаточного ресурса элементов машин изменение (приращение) параметра (износа) выражают (аппроксимируют) функцией, достаточно точно описывающей реальный процесс этого изменения и имеющей вид:

$$I(t) = V_c \cdot t^\alpha, \quad (3.54)$$

где V_c – случайная величина, характеризующая скорость изменения параметра; t – наработка или срок службы; α – показатель степени, определяющий характер зависимости изменения параметра от наработки.

Выбор такого аппроксимирующего выражения наряду с универсальностью функции обуславливается достаточно четким физическим смыслом его членов и относительно небольшим числом коэффициентов, что обеспечивает удобство использования при математических выкладках в процессе прогнозирования. При $\alpha = 1,0$ аппроксимирующее выражение представляет элементарную случайную линейную функцию. В этом случае скорость изменения параметра конкретного элемента является постоянной. При $\alpha > 1,0$ и $0 < \alpha < 1,0$ элементы имеют соответственно непрерывную монотонно возрастающую и убывающую скорость изменения параметра технического состояния. Выражение (3.54) может быть применено при аппроксимации и других функций. Например, при экспоненциальной функции изменения параметра она может быть приведена к выражению (3.54) с $\alpha = 1,0$ путем логарифмирования.

При определении остаточного ресурса конкретного элемента с помощью функции предполагается, что показатель степени α для данного

типа элементов найден ранее на основе обработки статистической информации об изменении параметра совокупности элементов и принимается постоянным для любого из одноименных элементов. Показатель же скорости изменения параметра V_c , т.е. угол наклона кривой, определяется с учетом изменения параметра $I(t)$ данного конкретного элемента за известную наработку t , после чего прогнозируется остаточный ресурс элемента $t_{ост}$ от момента контроля t до предельного изменения параметра.

В таблице 3.14 приведены ориентировочные значения показателя α , отражающего характер изнашивания деталей и соединений, а также изменение параметров состояния некоторых элементов и соединений машин.

Таблица 3.14 – Показатели степени функции изменения параметра

№ п/п	Наименование параметра	Показатель (α)
1.	Мощность двигателя	0,8
2.	Расход топлива	0,9
3.	Неравномерность топливоподачи	1,0
4.	Угар масла	1,8...2,0
5.	Износ плунжерных пар	1,1
6.	Расход газов, прорывающихся в картер	1,3
7.	Износ соединения гильза – поршень	1,3
8.	Износ шатунных и коренных подшипников двигателя	1,1
9.	Зазор между клапаном и коромыслом механизма газораспределения	1,1
10.	Утопание клапанов	1,6
11.	Зазоры в кривошипно-шатунном механизме	1,2...1,6
12.	Износ кулачков распределительного вала	1,1
13.	Радиальный зазор в подшипниках качения и скольжения	1,5
14.	Износ посадочных гнезд корпусных деталей	1,0
15.	Износ зубьев шестерен по толщине	1,5
16.	Износ валов, пальцев и осей	1,4
17.	Износ шлицевых соединений	1,1
18.	Износ дисков муфт сцепления, накладок тормозов и тормозных барабанов	1,0
19.	Удлинение шага гусеничной и втулочно-роликовой цепи	1,0
20.	Износ катков направляющих колес ходовой системы гусеничных машин	1,0

Допустим, что в момент t_k составную часть машины подвергли техническому диагностированию, в результате чего определим изменение допускаемого параметра I_k . Считая показатель степени α известным, из выражения (3.54) определим:

$$V_c = \frac{I_k}{t_k^\alpha}. \quad (3.55)$$

Составим прогноз работоспособности составной части по износу, принимая во внимание предстоящую наработку t_m и полагая, что предельное изменение допускаемого параметра равно I_{Π} . Графическая расчетная схема для данного случая приведена на рисунке 3.16.

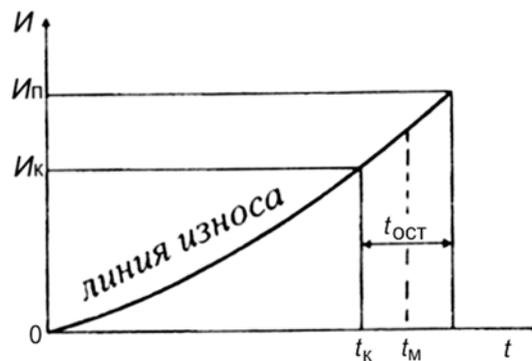


Рисунок 3.16 – Схема определения остаточного ресурса

Если окажется, что

$$I(t_k + t_m) = V_c(t_k + t_m)^\alpha < I_{\Pi},$$

то данная составная часть машины не нуждается в предупредительном восстановлении. Если t_m не задано, то остаточный ресурс $t_{ост}$ подсчитывают по такой зависимости:

$$V_c(t_k + t_{ост})^\alpha = I_{\Pi}. \quad (3.56)$$

После преобразования получим:

$$(t_k + t_{ост})^\alpha = \frac{I_{\Pi}}{V_c} = \frac{I_{\Pi}}{I_k} \cdot t_k^\alpha, \quad (3.57)$$

$$\text{ИЛИ } t_k + t_{ост} = \left(\frac{I_{\Pi}}{I_k} \right)^{1/\alpha} \cdot t_k. \quad (3.58)$$

Окончательно получим следующую формулу:

$$t_{ост} = t_k \left[\left(\frac{I_{\Pi}}{I_k} \right)^{1/\alpha} - 1 \right]. \quad (3.59)$$

Для вычисления I_{Π} и I_{κ} используются следующие зависимости:

$$I_{\Pi} = P_{\Pi} - P_{\Pi}; \quad (3.60)$$

$$I_{\kappa} = P_{\Pi}(t_{\kappa}) - P_{\Pi}, \quad (3.61)$$

где P_{Π} , $P_{\Pi}(t_{\kappa})$, P_{Π} – соответственно номинальное, действительное и предельное значения допустимого параметра.

Если у составной части изменение допускаемого параметра $I(t)$, например, износа, в зависимости от наработки происходит по линейному закону при $\alpha = 1,0$, то остаточный ресурс рассчитывается по следующей зависимости

$$t_{\text{ост}} = t_{\kappa} \left(\frac{I_{\Pi}}{I_{\kappa}} - 1 \right). \quad (3.62)$$

Номинальное значение параметра (P_{Π}) – величина, обусловленная функциональным назначением параметра и служащая началом отсчета отклонений. Номинальное значение свойственно новым и капитально отремонтированным деталям и составным частям. *Предельное значение параметра (P_{Π})* – это наибольшая или наименьшая величина, которую может иметь работоспособная составная часть машины, при которой целесообразно ее восстановление с оптимальной эффективностью. Имеется еще один норматив, являющийся основным для эксплуатационщиков – *допускаемое значение параметра* (или *допускаемый износ детали, соединения*), характеризуемый граничной величиной, при которой составная часть машины после контроля (дефектации) допускается к эксплуатации без выполнения операций технического обслуживания или ремонта. Допускаемое значение приводят в технической документации на обслуживание и ремонт машин.

При допускаемом значении параметра составная часть надежно работает до следующего планового контроля.

Допускаемое значение параметра определяется из выражения (3.59), приняв $I_{\kappa} = I_{\text{доп}}$ и $t_{\text{ост}} = t_{\text{доп}}$, получим:

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\Pi}}{(t_{\kappa} + t_{\text{ост, доп}})^{1/\alpha}} \cdot t_{\kappa}^{\alpha}. \quad (3.63)$$

Составные части новых машин после предпродажного обслуживания должны иметь номинальное значение параметров. Эти значения, как правило, должны сохраняться у новой машины в течение периода до наиболее сложного ТО (для тракторов ТО-3).

При следующих ТО или ремонте при оценке состояния машины используют допускаемые значения параметров.

Предельные значения параметров применяют при определении остаточного ресурса, а также при установлении неисправности составной части (достижение или превышение параметром предельного значения). Составные части работающей машины, если она не находится на ТО или ремонте, у которой параметры достигли предельных значений, считаются исправными.

Нормативные значения параметров по отдельным тракторам приведены в таблице 3.15, а для, например, расхода картерных газов – в таблице 3.16.

Пример 3.4. Для двигателя СМД-18, наработка которого от начала эксплуатации составила 3000 ч, максимальный зазор в шатунном подшипнике 0,45 мм, номинальный 0,12 мм, предельный 0,50 мм. Определить остаточный ресурс кривошипно-шатунного механизма.

Решение. По формулам (3.60) и (3.61) определим $I_{\text{п}} = 0,50 - 0,12 = 0,38$ мм; $I_{\text{к}} = 0,45 - 0,12 = 0,33$ мм. Значение показателя $\alpha = 1,4$ принимаем по таблице 3.14. Остаточный ресурс кривошипно-шатунного механизма двигателя определяется по формуле (3.59)

$$t_{\text{ост}} = 3000 \left[\left(\frac{0,38}{0,33} \right)^{1/1,4} - 1 \right] = 330 \text{ ч.}$$

Ответ: $t_{\text{ост}} = 330$ ч.

Пример 3.5. Определить остаточный ресурс детали, если ее предельный износ равен 1,5 мм. По результатам диагностирования установлено, что при наработке 1200 ч износ детали равен 0,5 мм. Коэффициент $\alpha = 1,0$.

Решение. По формуле (3.62) определим остаточный ресурс детали

$$t_{\text{ост}} = 1200 \left(\frac{1,5}{0,5} - 1 \right) = 2400 \text{ ч.}$$

Ответ: $t_{\text{ост}} = 2400$ ч.

Таблица 3.15 – Нормативные значения диагностических параметров базовых колесных тракторов

Наименование параметров	К-744Р1			К-744Р3			МТЗ-82.1, МТЗ 1221		
	ном.	доп.	пред.	ном.	доп.	пред.	ном.	доп.	пред.
	ЯМЗ-238НД5			8481.10-02, 8481.10-04			Д-245.5S2, 260.2 Turbo		
Двигатель	5,0			8,0			2,0		
Тяговый класс	5,0			8,0			2,0		
Эффективная эксплуатационная мощность двигателя, кВт	220 (300)	205 (279)	192,6	287 (390), 309 (420)	265 (360), 287 (390)	228,0	70 (95), 96(130)	59,25 (80), 85,15 (115)	50,7, 78,6
Расход топлива дизелем, л/ч при $n_{ном}$ холостого хода, кг/ч	21,5 17,8	24...26 20...21	– –	21,5 17,8	24...26 20...21	– –	6,7 5,5	6,8 5,6	– –
Удельный расход топлива, г/кВт ч	257 (189)	273,5	279,9	250 (185)	267,7	274,0	244,6 (220)	260,5	266,6
Давление в системе смазки прогретого двигателя при $n_{ном}$, МПа	0,4...0,7	0,35...0,7	0,3	0,4...0,7	0,35...0,7	0,3	0,2...0,3	0,15...0,4	0,08
То же, при $n_{мин}$, МПа	> 0,1	0,08...0,4	0,05	> 0,1	0,1...0,5	0,07	> 0,08	0,08...0,25	0,05
Расход картерных газов, л/мин	90	180	250	90	180	250	28	68	93
Установочный угол начала подачи топлива, град	19 ⁺¹	17...21	–	19 ⁺¹	17...21	–	26	24...28	–
Давление впрыскивания топлива Форсункой, МПа	16,5 ^{+1,5}	16,0...18,5	16	17,5...18	17...18,5	16	17,8...18,3	17...19,0	16
Минимальная устойчивая частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	650	750	–	800	850	–	600	650	–
Напряжение на аккумуляторной батарее при работе стартера, В	–	> 16	–	–	> 16	–	–	$\geq 10,5$ -Диз > 8,5-ПД	–
Суммарный угловой зазор карданной передачи переднего ведущего моста, град	0,3...0,5	4,5	5,5	0,3...0,5	4,5	5,5	0,3...0,5	2...3	4,5
То же, заднего моста, град	0,5...1	5	5,5	0,5...1	5	5,5	–	–	–
Суммарный угловой зазор переднего ведущего моста, град	17	45	60	17	45	60	12	25	35
То же, заднего моста, град	17	50	60	17	50	60	–	–	–
Свободный ход рулевого колеса, град	20	25	36	20	25	36	20	25	36
Уменьшение давления в гидроприводе навесного механизма за 5 с, МПа	0,5	2,3	–	0,5	2,3	–	0,5	2	–
Тормозная сила колес переднего моста	6600	3800	–	6600	3800	–	–	–	–
То же, заднего моста	3400	1900	–	3400	1900	–	2000	1450	–

Учитывая, что скорость изнашивания является случайной величиной, слабо коррелированной с наработкой, нельзя предполагать, что оставленная для дальнейшей работы деталь будет иметь ту же скорость изнашивания, что и до разборки агрегата и проведения изменений. Поэтому определять фактический остаточный ресурс детали следует с учетом доверительных границ их рассеяния $t_{\text{ост}}^B$ и $t_{\text{ост}}^H$. Если задаться законом распределения остаточного ресурса и доверительной вероятностью β , то не трудно определить доверительные границы возможного рассеивания остаточного ресурса.

Таблица 3.16 – Нормативные значения расхода картерных газов

Марка двигателя	Номинальная частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Расход картерных газов, л/мин		
		номинальный	допускаемый	предельный
ЯМЗ-238НБ	1700	65	130	180
ЯМЗ-240Б	1900	90	180	250
ЯМЗ-8423	1900	90	145	268
А-01М	1700	50	110	150
А-41	1750	40	100	140
Д-242	2100	25	65	80
Д-65	1750	25	53	75
Д-240	2200	28	68	95
Д-245	2100	52	115	160
Д-240Т	2200	35	80	110
Д-144-07/10/32	2000	35	80	90
Д-144	1800	30	70	90
Д-21	1800	10	36	45
ЗМЗ-53-11/3307	2500	22	30	110
ЗИЛ-645	2500	25	75	120
КамАЗ-740	2600	40...45	140	185

Установлено, что рассеивание ресурса одноименных деталей и соединений машин в большинстве случаев подчинено закону распределения Вейбулла с коэффициентом вариации $V = 0,33 \dots 0,40$. Принимая величину сдвига начала рассеивания $C = 0,3 \cdot t_{\text{ост}}$ и задавшись средней величиной $V = 0,36$, определим табулированные значения параметров распределения Вейбулла (см. таблицу 5 приложения): $b = 3,0$; $K_B = 0,89$.

Тогда параметр a будет равен:

$$a = (t_{\text{ост}} - 0,3 \cdot t_{\text{ост}}) / K_B = 0,7 \cdot t_{\text{ост}} / 0,89 = 0,79 \cdot t_{\text{ост}}.$$

Приняв величину доверительной вероятности $\beta = 0,80$ и пользуясь таблицей 14 приложения для ЗРВ (при $b = 3,0$), по формулам (3.35 и 3.36) определим доверительные границы рассеивания остаточного ресурса детали:

$$t_{\text{ост}}^H = H_K^B \left(\frac{1-\beta}{2} \right) \cdot a + C = H_K^B(0,05) \cdot 0,79t_{\text{ост}} + 0,3t_{\text{ост}} = 0,37 \cdot 0,79t_{\text{ост}} + 0,3t_{\text{ост}} = 0,60t_{\text{ост}}.$$

$$t_{\text{ост}}^B = H_K^B \left(\frac{1+\beta}{2} \right) \cdot a + C = H_K^B(0,9) \cdot 0,79t_{\text{ост}} + 0,3t_{\text{ост}} = 1,32 \cdot 0,79t_{\text{ост}} + 0,3t_{\text{ост}} = 1,34t_{\text{ост}}.$$

Все сказанное выше о расчете ресурсов детали полностью распространяется и на расчет ресурсов соединения (рисунок 3.17).

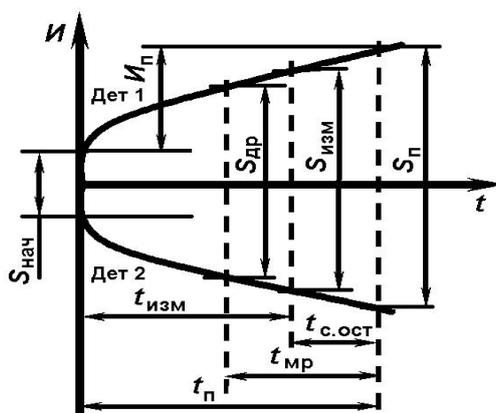


Рисунок 3.17 – Схема определения остаточного ресурса соединения

Расчет ресурсов соединения также может быть произведен или на основе непосредственных микрометражных измерений, или на основе средней скорости изнашивания соединения, определенной по значениям предельного $S_{\text{п}}$ и допустимого $S_{\text{др}}$ зазоров и межремонтного ресурса машины $t_{\text{мр}}$, указанных в типовой технологии ремонта.

Допустимым при ремонте зазором или износом называют такой, при котором остаточный ресурс соединения или детали равен установленному межремонтному ресурсу для машины или агрегата.

Остаточный и полный ресурсы соединения определяются соответственно по следующим уравнениям:

$$t_{\text{с.ост}} = \frac{S_{\text{п}} - S_{\text{изм}}}{V_{\text{сс}}}; \quad (3.63)$$

$$t_{\text{п}} = \frac{S_{\text{п}} - S_{\text{нач}}}{V_{\text{сс}}}; \quad (3.64)$$

$$V_{\text{сс}} = \frac{S_{\text{изм}} - S_{\text{нач}}}{t_{\text{изм}}}, \quad (3.65)$$

где V_{cc} – средняя скорость изнашивания соединения; $S_{п}$, $S_{изм}$, $S_{нач}$ – соответственно предельный (по техническим требованиям), измеренный и начальный (по чертежу) зазоры в соединении; $t_{изм}$ – наработка (или срок службы) от начала работы до момента измерения.

Тогда остаточный ресурс будет определяться следующим выражением:

$$t_{c.ост} = \frac{S_{п} - S_{изм}}{S_{изм} - S_{нач}} \cdot t_{изм}. \quad (3.66)$$

Определив величину остаточного ресурса детали, решают, оставить деталь для дальнейшей работы или заменить ее новой (восстановленной). При решении этого важного вопроса следует иметь в виду, что, с одной стороны, необходимо стремиться к более полному использованию ресурса деталей и соединений, а с другой, – машина не должна иметь отказов в процессе таких важных и ограниченных по времени повседневных работ.

Если сохранить детали (соединения) невозможно, так как остаточный ресурс одной из них недостаточен, рекомендуется использовать принцип соединения годной, но изношенной детали с новой или восстановленной, что позволяет повысить коэффициент использования ресурса деталей и соединений.

На рисунке 3.18 показана расчетная схема соединения годной изношенной детали (линия 1) с новой (восстановленной) деталью (линия 2).

Допуская, что скорость изнашивания соединения до и после замены детали остается постоянной, имеем:

$$V_{cc} = \frac{S_{изм} - S_{нач}}{t_{изм}} = \frac{S_{п} - S_{нач} - I_{изм}}{t_{c.ув}}, \quad (3.67)$$

где $I_{изм}$ – измеренный износ ранее работавшей детали; $t_{c.ув}$ – увеличенный остаточный ресурс соединения.

Используя уравнения (3.65) и (3.67), получим выражение для расчета увеличенного остаточного ресурса соединения:

$$t_{c.ув} = \frac{S_{п} - S_{нач} - I_{изм}}{S_{изм} - S_{нач}} \cdot t_{изм}. \quad (3.68)$$

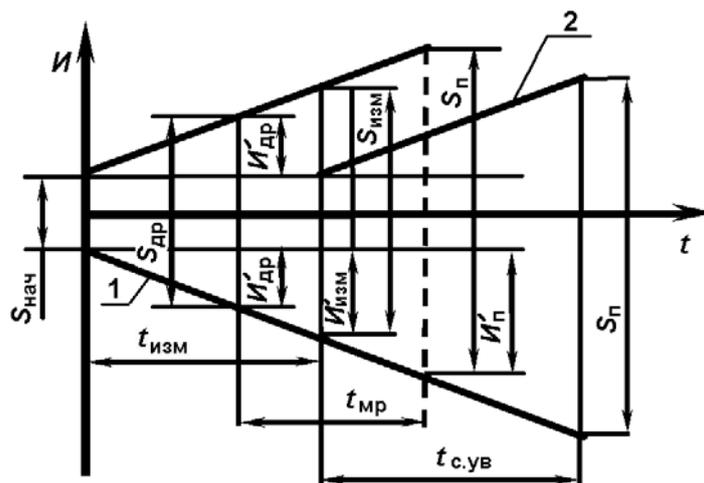


Рисунок 3.18 – Схема определения увеличенного ресурса соединения

Доверительные границы рассеивания остаточного и увеличенного остаточного ресурсов соединения при доверительной вероятности $\beta = 0,80$ будут равны:

$$t_{с.ост}^H = t_{с.ув}^H = 0,75 \cdot t_{с.ост}; \quad (3.69)$$

$$t_{с.ост}^B = t_{с.ув}^B = 1,35 \cdot t_{с.ост}. \quad (3.70)$$

Пример 3.6. У дизеля ЯМЗ-240 после наработки 3100 ч был проведен микрометраж соединения направляющей втулки и стержня выпускного клапана, при этом получено $D_{вт.изм} = 11,12$ мм, $d_{кл.изм} = 10,76$ мм. Определить остаточный ресурс соединения и увеличенный остаточный ресурс соединения при замене изношенной втулки на новую.

Решение. Из технических требований на дефектацию известно, что $S_{п} = 0,40$ мм, $D_{вт} = 11^{+0,027}$ мм, $d_{кл} = 11^{-0,070}_{-0,090}$.

Величина начального зазора в соединении с учетом износа во время приработки будет равна:

$$S_{нач} = D_{вт.макс} - d_{кл.мин} = 11,027 - 10,91 \approx 0,12 \text{ мм};$$

$$S_{изм} = D_{вт.изм} - d_{кл.изм} = 11,120 - 10,76 = 0,36 \text{ мм}.$$

Износ детали (клапана) $I_{изм}$ определяют с учетом возможного в процессе приработки износа:

$$I_{изм} = d_{кл.мин} - d_{кл.изм} = 10,91 - 10,76 = 0,15 \text{ мм}.$$

Остаточный ресурс соединения, рассчитанный по формуле (3.66), будет равен:

$$t_{с.ост} = \frac{0,40 - 0,36}{0,36 - 0,12} \cdot 3100 = 516 \text{ ч}.$$

Доверительные границы рассеивания остаточного ресурса (формулы 3.69 и 3.70):

$$t_{c.ост}^H = 0,75 \cdot 516 = 387 \text{ ч};$$

$$t_{c.ост}^B = 1,35 \cdot 516 = 697 \text{ ч}.$$

При замене изношенной втулки на новую остаточный ресурс, рассчитанный по формуле (3.68), будет равен:

$$t_{c.ув} = \frac{0,40 - 0,12 - 0,15}{0,36 - 0,12} \cdot 3100 = 1679 \text{ ч}.$$

Доверительные границы увеличенного остаточного ресурса соединения (формулы 3.69 и 3.70):

$$t_{c.ув}^H = 0,75 \cdot 1679 = 1259 \text{ ч};$$

$$t_{c.ув}^B = 1,35 \cdot 1679 = 2266 \text{ ч}.$$

Ответ: $t_{c.ост} = 516 \text{ ч}; t_{c.ув} = 1679 \text{ ч}.$

Пример 3.7. По результатам диагностирования двигателя ЯМЗ-240 с трехкратной повторностью определен зазор в соединении шейка распределительного вала – втулка $S_{изм} = 0,16 \text{ мм}$. Требуется рассчитать полный и остаточный ресурсы, предельные и допустимые износы соединения при следующих исходных данных:

- наработка машины от начала эксплуатации $t_{изм} = 1800 \text{ ч};$
- межремонтный ресурс соединения $t_{мр} = 3200 \text{ ч};$
- среднеквадратичное отклонение $\sigma = 0,25 \cdot t_{ост};$
- интенсивность изнашивания вала $i_B = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ мм / ч};$
- интенсивность изнашивания отверстия $i_o = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ мм / ч};$
- доверительная вероятность $\beta = 0,80.$

Технические требования на дефектацию соединения двигателя ЯМЗ-240 приведены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Выписка из технических требований на дефектацию соединений двигателя ЯМЗ-240

Наименование деталей и место измерения износа	Размеры деталей и соединения			
	Размеры по чертежу, мм	Зазоры в соединении, мм		
		начальный ($S_{нач}$)	допустимый ($S_{др}$)	предельный ($S_{п}$)
Втулка (диаметр отверстия – D_0)	$50^{+0,025}$			
Вал распределительный (диаметр шейки – d_B)	$50_{-0,089}^{-0,050}$	$+ 0,050 \dots + 0,114$	$+ 0,17$	$+ 0,25$

Решение. Интенсивность изнашивания соединения

$$i_c = (S_{\text{изм}} - S_{\text{нач}}) / t_{\text{изм}} = (0,16 - 0,114) / 1800 = 2,55 \cdot 10^{-5} \text{ мм / ч.}$$

Допустимый износ соединения

$$I_{\text{с.д}} = S_{\text{др}} - S_{\text{нач}} = 0,17 - 0,114 = 0,056 \text{ мм.}$$

Предельный износ соединения

$$I_{\text{с.п}} = S_{\text{п}} - S_{\text{нач}} = 0,25 - 0,114 = 0,136 \text{ мм.}$$

Полный ресурс $t_{\text{с.п}} = I_{\text{с.п}} / i_c = 0,136 / 2,55 \cdot 10^{-5} = 5330$ ч, а остаточный $t_{\text{с.ост}} = t_{\text{с.п}} - t_{\text{изм}} = 5330 - 1800 = 3530$ ч. Среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,25 \cdot t_{\text{ост}} = 0,25 \cdot 3530 = 880$ ч.

Полученные расчетные значения интенсивностей изнашивания и ресурсов следует рассматривать как средние из-за возможных отклонений вследствие нестабильности условий эксплуатации машин. Чтобы гарантировать безотказную работу соединения, очередное диагностирование назначают по нижней доверительной границе остаточного ресурса (при заданной доверительной вероятности $\beta = 0,80$) по формуле (3.69):

$$t_{\text{с.ост}}^H = 0,75 \cdot t_{\text{с.ост}} = 0,75 \cdot 3530 = 2650 \text{ ч.}$$

Предельные износы соединяемых деталей определяются пропорционально скоростям их изнашивания, как доли от предельного износа соединения:

- вала $I_{\text{в.п}} = I_{\text{с.п}} \cdot i_{\text{в}} / i_c = 0,136 \cdot 1,16 \cdot 10^{-5} / 2,55 \cdot 10^{-5} = 0,062$ мм;
- отверстия $I_{\text{о.п}} = I_{\text{с.п}} \cdot i_{\text{о}} / i_c = 0,136 \cdot 1,39 \cdot 10^{-5} / 2,55 \cdot 10^{-5} = 0,074$ мм.

Тогда предельные размеры деталей будут соответственно равны:

- вала $d_{\text{п}} = d_{\text{мин}} - I_{\text{в.п}} = 49,911 - 0,062 = 49,85$ мм;
- отверстия $D_{\text{п}} = D_{\text{макс}} + I_{\text{о.п}} = 50,025 + 0,074 = 50,10$ мм.

Здесь $d_{\text{мин}}$ и $D_{\text{макс}}$ — соответственно, наименьший диаметр вала и наибольший диаметр отверстия втулки с учетом допусков на их изготовление (см. таблицу 3.17).

Допустимые износы соединения при заданном значении межремонтной наработки составляет:

$$I_{\text{в.др}} = I_{\text{в.п}} - t_{\text{др}} \cdot i_{\text{в}} = 0,062 - 3200 \cdot 1,16 \cdot 10^{-5} = 0,025 \text{ мм;}$$

$$I_{\text{о.др}} = I_{\text{о.п}} - t_{\text{др}} \cdot i_{\text{о}} = 0,074 - 3200 \cdot 1,39 \cdot 10^{-5} = 0,030 \text{ мм.}$$

Допустимые без ремонта размеры соединения:

- вала $d_{\text{др}} = d_{\text{мин}} - I_{\text{в.др}} = 49,911 - 0,025 = 49,886$ мм;
- отверстия втулки $D_{\text{др}} = D_{\text{макс}} + I_{\text{о.др}} = 50,025 + 0,03 = 50,055$ мм.

По результатам расчетов можно провести проверку полученных значений. Разность допустимых или предельных размеров сопрягае-

МЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ДОЛЖНА БЫТЬ РАВНА СООТВЕТСТВЕННО ДОПУСТИМОМУ ИЛИ ПРЕДЕЛЬНОМУ ЗАЗОРУ В СОЕДИНЕНИИ (см. таблицу 3.17):

$$S_{др} = D_{др} - d_{др} = 50,055 - 49,886 = 0,17 \text{ мм};$$

$$S_{п} = D_{п} - d_{п} = 50,10 - 49,85 = 0,25 \text{ мм}.$$

На рисунке 3.19 приведена расчетная схема изнашивания деталей соединения в функции от наработки.

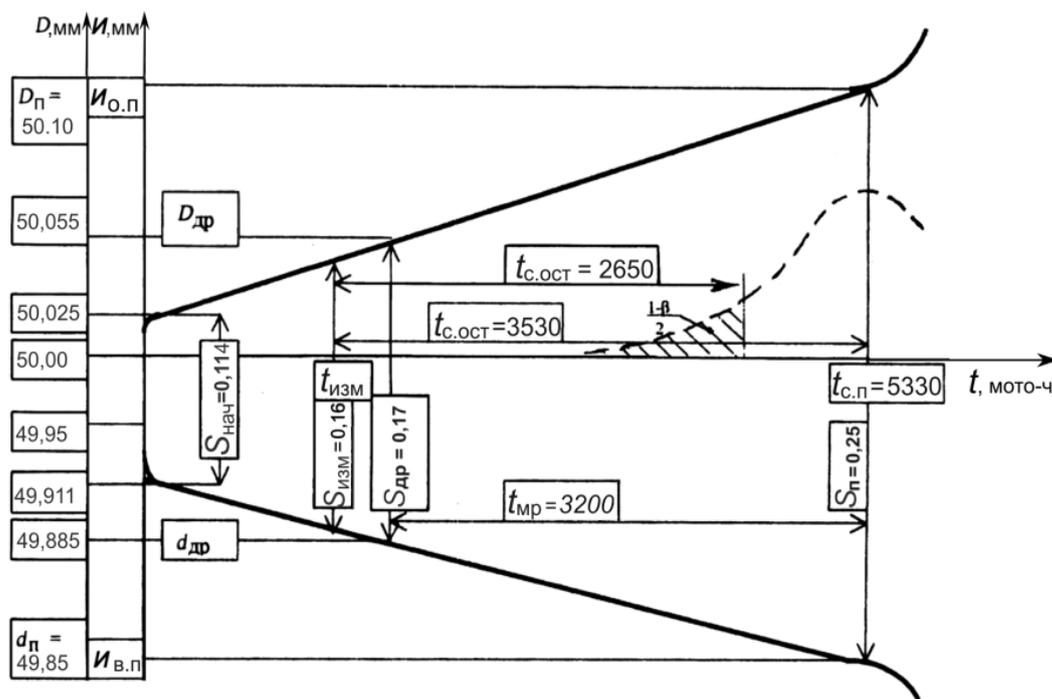


Рисунок 3.19 – Расчетная схема изнашивания соединения, определение его ресурса, износов и размеров деталей

На оси ординат откладывают номинальные, допустимые и предельные размеры деталей: вверх от нулевой линии – размеры отверстия, вниз – размеры вала, и отмечают поле допусков. На оси ординат откладывают значения износов обеих деталей и соответствующие зазоры. На оси абсцисс откладывают значение $t_{изм}$, полного и остаточного ресурса соединения, а также наработку до очередного диагностирования – нижнюю доверительную границу остаточного ресурса ($t_{с.ост}^H$).

На графике проводят линии износов обеих деталей и отмечают значение зазоров: начального (по чертежу) – $S_{нач}$; измеренного – $S_{изм}$; допустимого – $S_{др}$; предельного – $S_{п}$.

Ответ: $t_{с.п} = 5330$ ч; $t_{с.ост} = 3530$ ч;

$I_{в.п} = 0,062$ мм; $I_{о.п} = 0,074$ мм.

$I_{в.др} = 0,025$ мм; $I_{о.др} = 0,030$ мм;

Пример 3.8. Определить величину допускаемого значения износа пальцев гусеничной цепи трактора, средний ресурс пальцев, построить график вероятности безотказной работы $P(t)$ и определить 90 %-й и 80 %-й ресурсы.

Результаты измерений поперечных сечений трех пальцев в шести различных сечениях (рисунок 3.19) после наработки $T_{\text{то}} = 1000$ ч приведены в таблице 3.20.

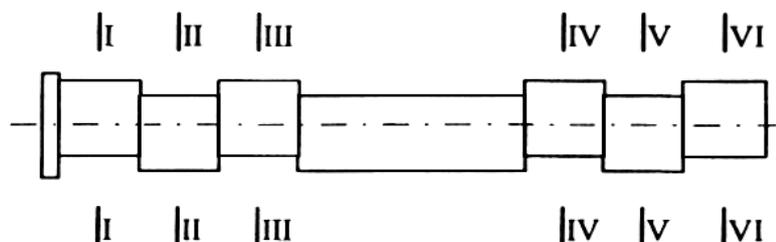


Рисунок 3.20 – Схема расположения сечений для измерения износа пальца гусеничной цепи

Предельные значения износа пальцев гусеничной цепи и номинальный диаметр пальца принимаем соответственно $I_{\text{п}} = 7$ мм, $d = 22$ мм. Принять значение $t_{\text{ост.доп}} = 700$ ч.

Решение. Рассматривая каждое сечение как самостоятельное, соответствующее одному пальцу, получим $N = 18$ величин износов. Задаваясь значением $\alpha = 1,4$ (см. таблицу 3.14), определяются соответственно величины из общего

$$t_i = T_{\text{то}} \left(\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{то}}} \right)^{1/\alpha},$$

где $I_{\text{то}}$ – величина износа i -й детали и остаточного (формула 3.58) ресурсов для каждого из 18 величин износа пальцев, а также допустимый износ (формула 3.61).

Таблица 3.18 – Результаты измерений размеров поперечных сечений пальцев, мм

Номер пальца	Номер сечения					
	I-I	II-II	III-III	IV-IV	V-V	VI-VI
1	20,5	19,8	19,6	19,8	19,3	20,5
2	20,3	18,8	18,7	18,7	18,6	20,0
3	20,2	18,9	18,6	18,6	18,5	20,0

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.19, откуда видно, что средний ресурс (формула 3.4) равен $\bar{T} = \frac{38725}{18} = 2150$ ч; среднее квадратическое отклонение (формула 3.6) $\sigma = \sqrt{\frac{382 \cdot 10^4}{18-1}} = 474$ ч; допустимый износ $I_{\text{доп}} = 3,33$ мм.

Принимая во внимание, что ресурс изнашиваемой детали описывается нормальным законом распределения, вероятность безотказной работы $P(t)$ определяется по формуле, приведенной в таблице 3.1:

$$P(t) = \Phi\left(\frac{\bar{T} - t}{\sigma}\right).$$

Как видно, общий ресурс гусеничных пальцев неодинаков и составляет 1641...3005 ч; остаточный ресурс также различен, и для наиболее изношенного пальца составляет $t_{\text{ост}} = 641$ ч (см. таблицу 3.19).

Сравнение износов в двух наиболее изношенных сечениях каждого пальца (рассматриваются пальцы с шестью сечениями) с допускаемым показывает, что первый и второй пальцы пригодны для дальнейшей эксплуатации; третий палец не пригоден, так как износы в двух наиболее изношенных сечениях превышают допускаемую величину.

График вероятности безотказной работы гусеничных пальцев представлен на рисунке 3.21, из которого видно, что 90 %-й ресурс $t_{90} = 1520$ ч; 80 %-й ресурс $t_{80} = 1760$ ч.

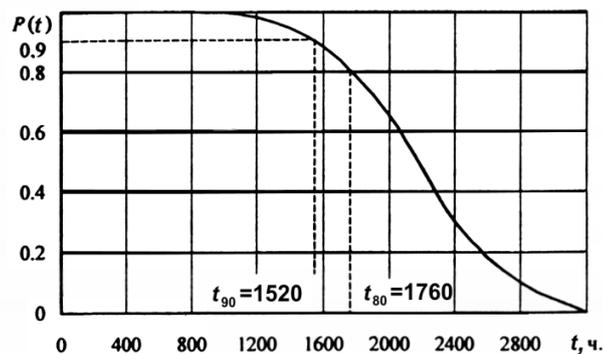


Рисунок 3.21 – Вероятность безотказной работы $P(t)$ детали и гамма-процентные ресурсы t_γ

Ответ: $I_{\text{доп}} = 3,33$ мм; $\bar{T} = 2150$ ч; $t_{90} = 1520$ ч; $t_{80} = 1760$ ч.

Таблица 3.19 – Результаты расчетов к примеру 3.8

Номер пальца	Номер сечения (рис.3.21)	Номер изменения	Износ I_i , мм	Ресурс общий t_i , ч	Остаточный ресурс $t_{ост}$, ч	Заключение о годности пальца	$(t - \bar{t}) \cdot 10^4$	$\frac{\bar{T} - t_i}{\sigma}$	Вероятность безотказной работы $P(t)$
1	I-I	1	1,5	3005	2005	годен	73,1	-1,804	0,036
	II-II	2	2,2	2286	1286		1,8	0,0	0,500
	III-III	3	2,4	2148	1148		0,0		
	IV-IV	4	2,2	2286	1286		1,8	0,376	0,644
	V-V	5	2,7	1975	975		3,1		
	VI-VI	6	1,5	3005	2005		73,1		
2	I-I	7	1,7	2748	1748	годен	35,8		
	II-II	8	3,2	1749	749		16,1		
	III-III	9	3,3	1711	711		19,3		
	IV-IV	10	3,3	1711	711		19,3		
	V-V	11	3,4	1675	675		22,6		
	VI-VI	12	2,0	2447	1447		8,8	-0,627	0,265
3	I-I	13	1,8	2628	1628	не годен	23,8		
	II-II	14	3,1	1789	789		13,0		
	III-III	15	3,1	1789	789		13,0		
	IV-IV	16	3,4	1675	675		22,6	1,07	0,859
	V-V	17	3,5	1641	641		25,9		
	VI-VI	18	2,0	2447	1447		8,8		
Σ				38725					$382 \cdot 10^4$

3.7. Расчетные зависимости надежности узлов и деталей машин по заданным критериям

Работоспособность узлов и деталей машин характеризуется рядом критериев, в качестве которых могут быть: прочность, усталость, износостойкость, точность и т. д. В этом случае расчет надежности основывается на сравнении по заданным критериям расчетных параметров с их предельными величинами.

Предельные величины параметров выбирают по нормативным или справочным данным.

Предположим, что распределение прочности описывается нормальным законом с плотностью вероятности $f_1(x)$, математическим ожиданием m_1 и средним квадратическим отклонением σ_1 .

Распределение нагрузки подчиняется нормальному закону с плотностью вероятности $f_2(x)$, математическим ожиданием m_2 и средним квадратическим отклонением σ_2 . Графически это показано на рисунке 3.22.

Вероятность безотказной работы определяется зависимостью:

$$P = \Phi\left(\frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}\right), \quad (3.71)$$

где $\Phi(U_p)$ – нормированная нормальная функция распределения, которая берется из таблицы 2 приложения.

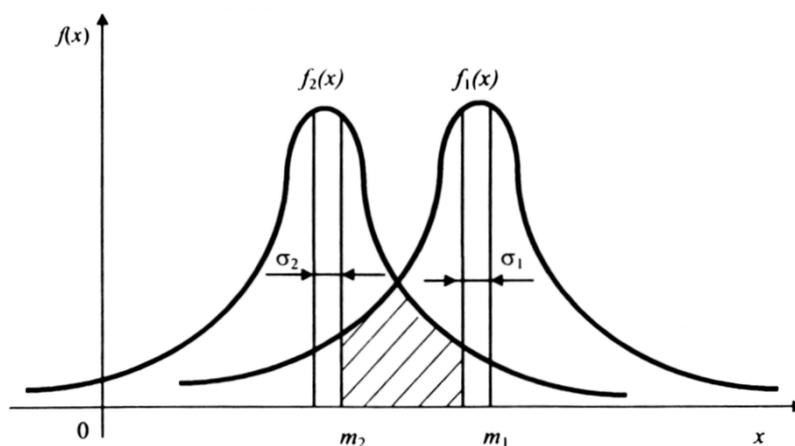


Рисунок 3.22 – Плотности вероятностей распределения нагрузки и прочности

Практически функция надежности в проектных расчетах определяется по величине запаса прочности для самых критических сечений. Если величина запаса прочности $n \geq 1,4$, то надежность в этом сечении близка к единице.

Вероятность безотказной работы узлов и деталей машин при известных значениях нагрузки с математическим ожиданием m и коэффициентом вариации V находят по квантили нормального распределения U_p :

$$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{(nV_1)^2 + V_2^2}}, \quad (3.72)$$

где $n = \frac{m_1}{m_2}$ – запас прочности; m_1 и m_2 – математическое ожидание соответственно

прочности и нагрузки; $V_1 = \frac{\sigma_1}{m_1}$ – коэффициент вариации несущей способности

(прочности); $V_2 = \frac{\sigma_2}{m_2}$ – коэффициент вариации усилия (действующей нагрузки); σ_1

и σ_2 – средние квадратические отклонения, соответственно прочности и нагрузки.

Пример 3.9. Определить вероятность безотказной работы узла металлоконструкции, если известно, что математическое ожидание предела прочности в критическом сечении равно $m_1 = 640$ МПа при среднем квадратическом отклонении $\sigma_1 = 40$ МПа. Математическое ожидание действующей нагрузки равно $m_2 = 540$ МПа при среднем квадратическом отклонении $\sigma_2 = 40$ МПа.

Решение. Вычислим запас прочности

$$n = \frac{m_1}{m_2} = \frac{640}{540} = 1,18.$$

Далее вычислим коэффициенты вариации:

$$V_1 = \frac{\sigma_1}{m_1} = \frac{40}{640} = 0,062; \quad V_2 = \frac{\sigma_2}{m_2} = \frac{40}{540} = 0,074.$$

По формуле (3.72) вычислим квантиль

$$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{(nV_1)^2 + V_2^2}} = \frac{1,18-1}{\sqrt{(1,18 \cdot 0,062)^2 + (0,074)^2}} = 1,73.$$

По таблице 1 приложения находим искомую вероятность $P = 0,958$.

Ответ: $P = 0,958$.

Ниже в таблице 3.20 приведены расчетные формулы по определению нестационарной случайной функции надежности узлов и деталей для различных критериев.

Таблица 3.20 – Расчетные зависимости для вычисления квантилей нормального распределения по заданным критериям

№	Критерий	Расчетные формулы для квантилей	Обозначение величин, входящих в формулы
1	2	3	4
1	Износ трущихся поверхностей двигателей	$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 V_\Delta^2 + V_J^2}}, \quad (1.1)$ $n = \frac{\Delta}{JVt}, \quad (1.2)$ $V_J = \frac{\sigma_J}{J}, \quad (1.3)$ $V_\Delta = \frac{\sigma_h}{\Delta}, \quad (1.4)$ <p>$\Delta = h_{нач} - h_{пред}$ при уменьшении размера; $\Delta = h_{пред} - h_{нач}$ при увеличении размера</p>	<p>n – коэффициент запаса по износу; V_Δ – коэффициент вариации размера детали; V_J – коэффициент вариации интенсивности изнашивания; σ_h – среднее квадратическое отклонение начального размера; σ_J – среднее квадратическое отклонение интенсивности изнашивания; $h_{пред}$ – предельно допустимое значение размера при износе; $h_{нач}$ – начальное значение размера; J – среднее значение интенсивности изнашивания; V – скорость относительного перемещения трущихся поверхностей; t – время работы трущихся поверхностей</p>
2	Теплостойкость детали или узла	$U_p = \frac{n-1}{V}, \quad (2.1)$ $n = \frac{t_{пр}}{t + t_о}, \quad (2.2)$ $V = \frac{\sigma}{t}, \quad (2.3)$	<p>n – коэффициент запаса теплостойкости; $t_{пр}$ – предельно допустимая температура конструкции; t – средняя температура конструкции; $t_о$ – температура окружающей среды; V – коэффициент вариации температуры; σ – среднее квадратическое отклонение избыточной температуры</p>
3	Прочность сцепления (соединение с натягом)	$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 V_{пр}^2 + V^2}}, \quad (3.1)$ $n = \frac{T_{пр}}{T}, \quad (3.2)$	<p>n – коэффициент запаса прочности; $T_{пр}$ – среднее значение предельного момента; T – среднее значение момента; $V_{пр}$ – коэффициент вариации предельного момента; V – коэффициент вариации среднего момента</p>

Продолжение таблицы 3.20

4	Прочность детали	$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 V_t^2 + V_p^2}}, \quad (4.1)$	<p>n – коэффициент запаса прочности в зависимости от средних значений предела текучести σ_t и напряжения $\sigma_{\text{экв}}$;</p> <p>V_t – коэффициент вариации предела текучести;</p> <p>V_p – коэффициент вариации давления;</p>
5	Сопротивление усталости сварочного шва	$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 V_{-1}^2 + V_A^2}}, \quad (5.1)$	<p>n – коэффициент запаса прочности шва в зависимости от средних напряжений;</p> <p>V_{-1} – коэффициент вариации предела выносливости сварного шва;</p> <p>V_A – коэффициент вариации нагрузки;</p> <p>σ_{-1} – среднее значение предела выносливости;</p> <p>σ_A – среднее значение действующих напряжений</p>
Надежность болтового соединения			
6	Нераскрытие стыка	$U_{p1} = \frac{n_1-1}{\sqrt{n_1^2 V_{\text{зат}}^2 + V_F^2}}, \quad (6.1)$	<p>n_1 – коэффициент запаса нераскрытия стыка по средним нагрузкам;</p> <p>$F_{\text{зат}}$ – сила затяжки болтового соединения;</p> <p>F – центральная отрывающая сила;</p> <p>β_c – коэффициент, учитывающий возможное ослабление затяжки;</p> <p>$(1-\chi)$ – множитель, характеризующий долю внешней нагрузки на стык;</p> <p>$V_{\text{зат}}$ и V_F – коэффициенты вариации случайных сил $F_{\text{зат}}$ и F;</p> <p>$\sigma_{\text{зат}}$ – среднее значение напряжения затяжки;</p> <p>d_p – расчетный диаметр резьбы</p>
7	Несдвигаемость стыка	$U_{p2} = \frac{n_2-1}{\sqrt{n_2^2 V_{\text{пр}}^2 + V_F^2}}, \quad (7.1)$	<p>n_2 – коэффициент запаса несдвигаемости по средним нагрузкам;</p> <p>f – среднее значение коэффициента трения;</p> <p>$V_{\text{пр}}$ – коэффициент вариации по несдвигаемости;</p>
		$n_2 = \frac{f \cdot F_{\text{зат}}}{\beta_c \cdot F}, \quad (7.2)$	
		$V_{\text{пр}} = \sqrt{V_{\text{зат}}^2 + V_F^2}, \quad (7.3)$	

Продолжение таблицы 3.20

8	Прочность болта	$U_{p3} = \frac{n_3 - 1}{\sqrt{n_3^2 V_{\sigma_t}^2 + V_{pac}^2}}, \quad (8.1)$ $n_3 = \frac{\sigma_t}{\sigma_{pac}}, \quad (8.2)$ $\sigma_{pac} = \frac{4}{\pi d_p^2} (kF_{зат} + \chi F), \quad (8.3)$	<p>n_2 – коэффициент запаса прочности; σ_t и V_{σ_t} – среднее значение и коэффициент вариации предела текучести материала болта; k – коэффициент, учитывающий кручение болта (если кручение болта при затяжке исключено, то $k = 1,0$; в остальных случаях $k = 1,3$); σ_{pac} и V_{pac} – расчетное значение и коэффициент вариации напряжения текучести; χ – множитель внешней нагрузки</p>
9	Выносливость болта	$U_{p4} = \frac{n_4 - 1}{\sqrt{n_4^2 V_{-1}^2 + V_A^2}}, \quad (9.1)$ $n_4 = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_A}, \quad (9.2)$	<p>n_4 – коэффициент запаса выносливости болта; σ_{-1} – среднее значение предела выносливости болта; σ_A – среднее значение напряжений, действующих в материале болта; V_{-1} и V_A – коэффициенты вариации предела выносливости и действующих напряжений; ψ – коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла;</p>
9	Выносливость болта	$\sigma_A = \frac{4}{\pi d_p^2} [0,5\chi F + \frac{\psi}{k_\sigma} (F_{зат} + 0,5\chi F)] \quad (9.3)$	<p>k_σ – среднее значение коэффициента концентрации напряжений в зависимости от предела σ_B прочности материала</p>
10	Вероятность безотказной работы болтового соединения по всем критериям	$P = \Phi(U_{p1}) \cdot \Phi(U_{p2}) \times \Phi(U_{p3}) \cdot \Phi(U_{p4}) \quad (10.1)$	<p>$\Phi(U_{p1})$ – вероятность безотказной работы по критерию нераскрытия стыка; $\Phi(U_{p2})$ – вероятность безотказной работы по критерию стыка; $\Phi(U_{p3})$ – вероятность безотказной работы по критерию прочности; $\Phi(U_{p4})$ – вероятность безотказной работы по критерию выносливости; U_{pi} – квантили функции нормального распределения, выбираемые по таблице 1 приложения</p>
Надежность элементов привода			

Продолжение таблицы 3.20

11	Неразрушение вала	$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 V_{-1}^2 + V_A^2}}, \quad (11.1)$ $n = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_A}, \quad (11.2)$	<p>n – коэффициент запаса прочности; σ_{-1} – среднее значение предела выносливости материала вала; σ_A – среднее значение действующей на вал нагрузки; V_{-1} и V_A – коэффициенты вариации предела выносливости материала вала и действующей на вал нагрузки</p>
12	Неразрушение подшипника качения	$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 V_c^2 + V_p^2}}, \quad (12.1)$ $n = \frac{\bar{C}}{PL^{1/S}}, \quad (12.2)$	<p>n – коэффициент запаса по средним нагрузкам; V_c и V_p – коэффициенты вариации динамической грузоподъемности и динамической эквивалентной нагрузки; $\bar{C} = 1,46 C$ – для роликоподшипников; $\bar{C} = 1,52 C$ – для шарикоподшипников; C – среднее значение динамической грузоподъемности (выбирают по справочнику-каталогу); P – среднее значение динамической эквивалентной нагрузки; L – заданный ресурс; $S = 3$ – для шарикоподшипников; $S = 3,3$ – для роликоподшипников; $V_c = 0,25$ – для роликоподшипников; $V_c = 0,27$ – для шарикоподшипников</p>
13	Неразрушение предохранительной муфты с разрушающимися элементами [зависит от безотказной передачи муфтой внешнего расчетного момента, с одной стороны, и безотказности срабатывания (разрушения) предохранительного устройства при недопустимых нагрузках – с другой стороны]	$U_{p1} = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 V_p^2 + V_A^2}}, \quad (13.1)$ $n = \frac{T_p}{T_A}, \quad (13.2)$ $\tau = C \cdot \sigma_{вр}, \quad (13.3)$ <p>используют при расчете T_p и T_A</p>	<p>n – коэффициент запаса по средним значениям моментов для безотказной передачи; T_p и T_A – среднее значение разрушающего и действующего моментов; V_p и V_A – коэффициенты вариации разрушающего и действующего моментов; d – диаметр опасного сечения; R – радиус расположения штифта; τ – напряжение среза в разрушающемся элементе; $C = 0,95$ – для штифтов с выточкой; $C = 0,75$ – для штифтов без выточки; $\sigma_{вр}$ – предел прочности материала</p>

Продолжение таблицы 3.20

14	Разрушение предохранительного элемента	$U_{p2} = \frac{n_{\text{зап}} - 1}{V_p}, \quad (14.1)$ $n = \frac{T_{\text{пик}}}{T_p}, \quad (14.2)$	$n_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса по средним значениям для разрушения $V_p = (0,06 \dots 0,08)$; $T_{\text{пик}}$ – пиковая нагрузка; T_p – действующая нагрузка
15	Вероятность безотказной работы предохранительной муфты	$P = \Phi(U_{p1}) \cdot \Phi(U_{p2}), \quad (15.1)$	–

Пример 3.10. Две стальные детали стянуты болтом М12 с усилием от 0 до F . Среднее значение силы $F = 10^4$ Н, коэффициент вариации силы равен $V_F = 0,2$. Определить вероятность безотказной работы болтового соединения по основным критериям: нераскрытия стыка, статистической прочности и усталости болта. Контроль затяжки болта осуществляется динамометрическим ключом.

Исходные данные для расчета: $\chi = 0,2$; $\sigma_t = 380$ МПа; $\sigma_{-1} = 40$ МПа; $V_{\sigma_t} = 0,05$; $\sigma_{\text{заг}} = 200$ МПа; $\beta_c = 1,2$; $k_\sigma = 3,0$; $\psi = 0,1$; $V_{\text{заг}} = 0,08$; $V_A = 0,1$; $d_p = 10,2$ мм; $V_{-1} = 0,15$.

Решение. Вычислим среднее значение силы затяжки по формуле (6.3) таблицы 3.20.

$$F_{\text{заг}} = \sigma_{\text{заг}} \pi \frac{d_p^2}{4} = 200 \cdot 3,14 \cdot \frac{10,2^2}{4} = 1,63 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Коэффициент запаса по нераскрытию стыка по формуле (6.2) таблицы 3.20 будет равен:

$$n_1 = \frac{F_{\text{заг}}}{\beta_c F (1 - \chi)} = \frac{1,63 \cdot 10^4}{1,2 \cdot 10^4 (1 - 0,2)} = 1,69.$$

По формуле (6.1) таблицы 3.20 вычислим квантиль:

$$U_{p1} = \frac{n_1 - 1}{\sqrt{n_1^2 V_{\text{заг}}^2 + V_F^2}} = \frac{1,69 - 1}{\sqrt{1,69^2 \cdot 0,08^2 + 0,2^2}} = 2,86.$$

По таблице 2 приложения находим:

$$P_1 = \Phi(2,86) = 0,9977.$$

Определим среднее значение расчетного напряжения по формуле (8.3) таблицы 3.20:

$$\sigma_{\text{рас}} = \frac{4}{\pi d_p^2} (kF_{\text{зат}} + \chi F) = \frac{4}{3,14 \cdot 10,2^2} (1,3 \cdot 1,63 \cdot 10^4 + 0,2 \cdot 10^4) = 284 \text{ МПа.}$$

Коэффициент запаса прочности по средним напряжениям (формула (8.2) таблицы 3.20):

$$n_3 = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\text{рас}}} = \frac{380}{284} = 1,34.$$

Полагая, что $V_{\text{рас}} = V_{\text{зат}}$, определим квантиль по формуле (8.1) таблицы 3.20:

$$U_{p3} = \frac{n_3 - 1}{\sqrt{n_3^2 V_{\sigma_t}^2 + V_{\text{рас}}^2}} = \frac{1,34 - 1}{\sqrt{1,34^2 \cdot 0,05^2 + 0,08^2}} = 3,3.$$

Вероятность безотказной работы по статистической прочности равна:

$$P_3 = \Phi(3,3) = 0,9995.$$

Вычислим среднее значение действующего напряжения по формуле (9.3) таблицы 3.20:

$$\begin{aligned} \sigma_A &= \frac{4}{\pi d_p^2} \left[0,5\chi F + \frac{\Psi}{k_\sigma} (F_{\text{зат}} + 0,5\chi F) \right] = \\ &= \frac{4}{3,14 \cdot 10,2^2} \left[0,5 \cdot 0,2 \cdot 10^4 + \frac{0,1}{3,0} (1,63 \cdot 10^4 + 0,5 \cdot 0,2 \cdot 10^4) \right] = 19,3 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Коэффициент запаса прочности по средним напряжениям определим по формуле (9.2) таблицы 3.20:

$$n_4 = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_A} = \frac{40}{19,3} \approx 2,07.$$

Квантиль по формуле (9.1) таблицы 3.20 равна:

$$U_{p4} = \frac{n_4 - 1}{\sqrt{n_4^2 V_{-1}^2 + V_A^2}} = \frac{5 - 1}{\sqrt{2,07^2 \cdot 0,15^2 + 0,1^2}} = 3,28.$$

Вероятность безотказной работы по критерию усталости равна:

$$P_4 = \Phi(3,28) \approx 0,9994.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы болтового соединения по формуле (10.1) таблицы 3.20 равна:

$$P = P_1 \cdot P_3 \cdot P_4 = 0,9977 \cdot 0,9995 \cdot 0,9994 = 0,996.$$

Ответ: $P = 0,996$.

Пример 3.11. Определить вероятность безотказной работы роликоподшипника 2207, нагруженного случайной радиальной силой при следующих исходных данных:

$P = 400$ Н – среднее значение эквивалентной нагрузки;

$n = 400$ мин⁻¹ – частота вращения внутреннего кольца подшипника;

$L = 3000$ ч – заданный ресурс;

$V_F = 0,1$ – коэффициент вариации радиальной силы.

Решение. По справочнику-каталогу определяем 90 % динамическую грузоподъемность $C = 25\,600$ Н.

Вычислим заданный ресурс в миллионах оборотов:

$$L = 60 \cdot n \cdot L \cdot 10^{-6} = 60 \cdot 400 \cdot 3000 \cdot 10^{-6} = 72.$$

Далее вычислим среднее значение динамической грузоподъемности

$$\bar{G} = 1,46 \cdot G = 1,46 \cdot 25600 = 37400 \text{ Н.}$$

Коэффициент запаса по формуле (12.2) таблицы 3.20 равен:

$$n = \frac{\bar{G}}{PL^{1/3}} = \frac{37400}{400 \cdot 72^{1/3,3}} = 25,58.$$

Коэффициент вариации эквивалентной динамической нагрузки принимаем равным коэффициенту вариации внешней нагрузки

$$V_p = V_F = 0,1.$$

Тогда квантиль нормального распределения будет по формуле (12.1) таблица 3.20 равна:

$$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 V_c^2 + V_p^2}} = \frac{25,58-1}{\sqrt{25,58^2 \cdot 0,25^2 + 0,1^2}} = 3,84.$$

По таблице 2 приложения находим вероятность безотказной работы:

$$P = \Phi(3,84) \approx 0,999.$$

Ответ: $P = 0,999$.

ГЛАВА 4

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Общие сведения о сложных технических системах

Большинство машин являются достаточно сложными техническими системами, состоящими из отдельных узлов, деталей, агрегатов, систем управления и т. п.

Под *сложной системой* понимается объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть разделен на элементы, каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы. Такое определение системы условно. Оно может применяться к отдельным системам и механизмам (двигатель, система подачи топлива к двигателю), к машинам (трактор, автомобиль, станок) и к системам машин (цех машиностроительного завода). Чем сложнее система, тем более разнообразны требования к ее функционированию и тем наибольшее число исходных параметров устанавливаются нормативами.

При анализе надежности сложных технических систем их разбирают на элементы с тем, чтобы вначале рассмотреть параметры и характеристики элементов, а затем оценить работоспособность всей системы. Поэтому под элементом будем понимать составную часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами.

Элемент обладает следующими особенностями:

- он выделяется в зависимости от поставленной задачи, может быть достаточно сложным и состоять из отдельных деталей и сборочных единиц;
- при исследовании надежности системы элемент не делят на составные части, и показатели безотказности и долговечности относятся к элементу в целом;
- возможно восстановление работоспособности элемента независимо от других частей и элементов системы.

Следовательно, выходные параметры элемента при их изменении в процессе эксплуатации должны удовлетворять определенным требованиям, предъявляемым к надежности всей системы.

4.2. Структурные модели надежности элементов сложных технических систем

Надежность технической системы зависит от надежности составляющих ее элементов. При этом решающее значение имеет структура системы. Из высоконадежных элементов можно получить в целом ненадежную систему, а из элементов с относительно невысокой надежностью – систему с высоким уровнем надежности.

Параметр сложного потока отказов равен сумме параметров потоков его составляющих. Этот вывод часто используют при анализе отказов различных элементов и сложных систем. Например, рассматривая поток отказов всей машины, разбивают его на потоки отказов механических, гидравлических, электромеханических и электронных систем. В других случаях разделяют машину на функциональные системы и узлы и оценивают удельный вес отдельных составляющих потока отказов [17].

Для более детального анализа характера и причин отказов строят так называемую схему Исикава (рисунок 4.1, *а*) или диаграмму, характеризующую удельный вес различных отказов изделия (диаграмма Парето рисунок 4.1, *б*). Так, например, при анализе отказов объемного регулируемого гидропривода строилась схема Исикава (рисунок 4.1, *а*), в которой «ветви» характеризовали слабые элементы гидропривода: уплотнения 1, золотниковые распределительные устройства 2, механические 3 и электрические 4 элементы, клапаны 5 и фильтры 6.

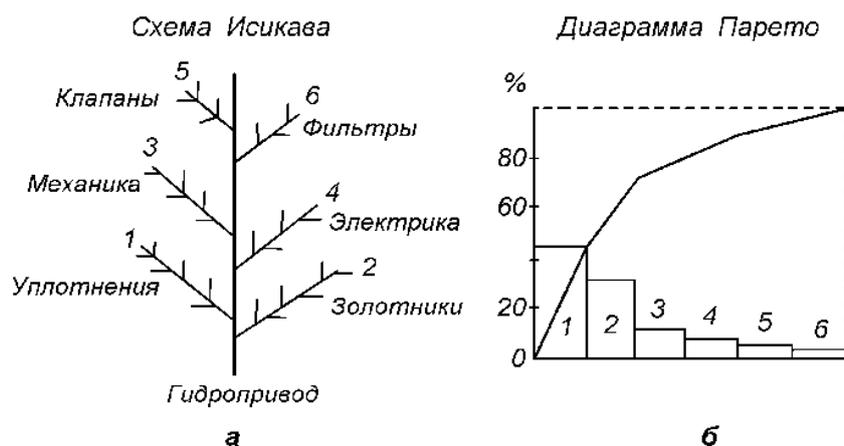


Рисунок 4.1 – Графический анализ потока отказов: схема Исикава (*а*) и диаграмма Парето (*б*)

На ответвлениях указываются обычно виды и характер отказов, например, «износ уплотнений», «засорение фильтра», «повышение усилия страгивания золотника» и др.

В диаграмме Парето (см. рисунок 4.1, б) указывается процентное соотношение рассматриваемых отказов, которые ранжируются по значимости, и строится кривая кумулятивного (накопленного) процента отказов.

При возможности расчленения сложной системы на отдельные независимые элементы для расчета надежности достаточно широко используются структурные схемы. В данных схемах каждый i -й элемент характеризуется вероятностью его безотказной работы p_i в течение заданного периода времени и по этим значениям определяют вероятность безотказной работы $P(t)$ всей системы. Такие расчеты обычно называют *расчетной схемной надежностью*.

При расчете надежности изделие (машину в целом или отдельную сборочную единицу) рассматривают как совокупность самостоятельных элементов. При этом если отказ каждого из элементов ведет к отказу всей машины (или совокупности элементов), то элементы соединяют *последовательно*. Если же отказ системы возникает при условии одновременного отказа нескольких элементов, то эти элементы соединяют *параллельно*. Наиболее характерен случай, когда отказ одного элемента выводит из строя всю систему, как это имеет место, например, при последовательном соединении элементов (рисунок 4.2).

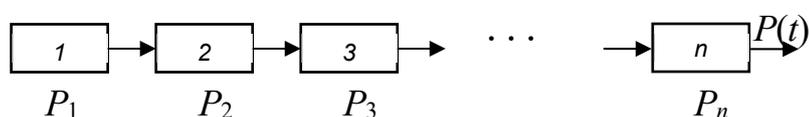


Рисунок 4.2 – Схема последовательного соединения элементов сложной системы:

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ – вероятности безотказной работы
1, 2, 3, ..., n -го элемента

Данный случай является достаточно характерным. Большинство приводов машин и механизмов передач подчиняется этому условию. Так, если в приводе машин откажет любой из его элементов – электродвигатель, редуктор, муфта, механизмы управления, насос смазки, то весь привод перестанет функционировать. При этом отдельные элементы не обязательно должны быть соединены последовательно.

Зная вероятность безотказной работы каждого элемента P_i за период времени t и полагая, что отказы элементов статистически независимы, можно определить вероятность безотказной работы технической

системы (машины или сборочной единицы), как произведение вероятностей безотказной работы элементов (по теореме умножения вероятностей независимых событий):

$$P(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (4.1)$$

где n – число элементов или подсистем; P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента или подсистемы.

При одинаковой надежности элементов формула (4.1) примет следующий вид:

$$P(t) = P_i^n. \quad (4.2)$$

Сложные технические системы, состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью за счет наличия большого числа элементов. Например, если агрегат состоит из 50 деталей, а вероятность безотказной работы каждой детали за выбранный промежуток времени составляет $P_i = 0,99$, то вероятность безотказной работы узла по формуле (4.2) будет $P(t) = 0,99^{50} = 0,55$. Если же агрегат с аналогичной безотказностью состоит из 400 деталей, то $P(t) = 0,99^{400} = 0,018$, т. е. узел становится практически неработоспособным. Следовательно, с увеличением элементов общая надежность системы уменьшается, т. к. $P(t) < 1$.

Если значения наработки элементов до отказа распределены по экспоненциальному закону $P_1 = e^{-\lambda_1 t}$; $P_2 = e^{-\lambda_2 t}$ (т.е. элементы имеют постоянные интенсивности отказов), то вероятность безотказной работы i -го элемента определяется по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda_i t}. \quad (4.3)$$

Подставляя соотношение (4.3) в формулу (4.1), получим:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}. \quad (4.4)$$

Тогда, среднее время безотказной работы определяется как:

$$\bar{T}_0 = \int_0^{\infty} e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (4.5)$$

Полученное выражение показывает, что среднее время безотказной работы системы с последовательным соединением элементов

есть величина, обратная сумме интенсивности отказов отдельных элементов.

Система с параллельным соединением выходит из строя только в случае отказа всех ее элементов при условии, что все элементы системы функционируют и находятся под нагрузкой, а отказы элементов статистически независимы (рисунок 4.3).

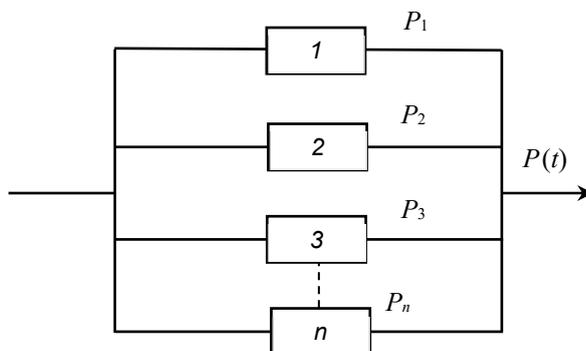


Рисунок 4.3 – Блок-схема системы с параллельным соединением элементов

Безотказность $P(t)$ системы с параллельным соединением неодинаковых элементов определяется как:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (4.6)$$

Если интенсивности отказов элементов постоянны, то, подставляя выражение (4.3) в формулу (4.6), получим:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}). \quad (4.7)$$

Интегрируя уравнение (4.7) в интервале $[0, \infty]$, находим среднее время безотказной работы \bar{T}_0 :

$$\begin{aligned} \bar{T}_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \right\} dt = & \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \right) - \\ & - \left(\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} + \dots \right) + \left(\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4} + \dots \right) + (-1)^{n+1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

В случае одинаковых элементов выражение (4.8) принимает следующий вид:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}. \quad (4.9)$$

Таким образом, простота расчета надежности сложных технических систем при экспоненциальном законе часто приводит к тому, что

этим правилом пользуются и в тех случаях, когда причина выхода из строя – постепенный отказ с другим законом распределения.

4.3. Резервирование и его разновидности для повышения надежности сложных технических систем

Для повышения надежности сложных технических систем можно применять метод резервирования, т.е. создавать дополнительные средства и возможности для сохранения работоспособности системы при отказе одного или нескольких ее элементов. При резервировании ненадежных элементов после отказа основного элемента дублер выполняет его работу и узел продолжает функционировать.

Резервированием называется метод повышения надежности системы путем введения в нее резервных (запасных) блоков, которые являются избыточными по отношению к основным блокам и могут выполнять их функции (рисунок 4.4). При этом элемент 1 является основным и называется *резервируемым*. Элементы $2, \dots, n$ предназначены для выполнения функций в случае отказа элемента 1 и называются *резервными*.

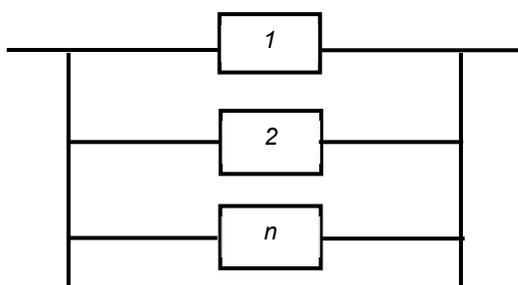


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема резервирования

Главный параметр резервирования – кратность резервирования K , равная отношению числа резервных блоков (элементов) к числу основных. При $K = 1$ резервирование называется *дублированием*. В зависимости от значения K резервирование может быть с целой и дробной кратностью.

Наибольшее распространение получили два вида резервирования:

- постоянное резервирование с нагруженным (горячим) резервом;
- резервирование замещением с ненагруженным (холодным) резервом.

В первом случае резервные блоки постоянно включены в работу наравне с основными, во втором – резервные блоки включаются в ра-

боту только при отказе основных. Если дублируется работа всей системы, то резервирование называется *общим*, а при дублировании отдельных основных блоков – *раздельным*. Рассмотрим более подробно все схемы резервирования.

При постоянном (нагруженном) резервировании резервные элементы, как уже отмечалось, постоянно присоединены к основным и находятся в одинаковом с ними режиме работы (рисунок 4.5, *a*).

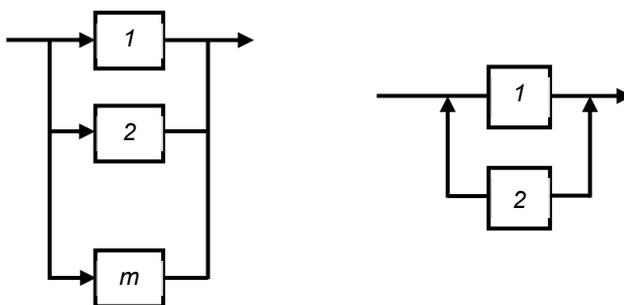


Рисунок 4.5 – Схема резервирования элемента:
нагруженный (*a*) и ненагруженный дублирующий элемент (*b*)

Вероятность безотказной работы $P(t)$ системы, состоящей из основного и $(m - 1)$ резервных элементов, может быть подсчитана следующим образом. Пусть q_1, q_2, \dots, q_m – вероятности появления отказа каждого из m элементов за время t . Тогда отказ системы – это сложное событие, которое будет иметь место при условии отказа всех элементов, и вероятность совместного появления всех отказов $F(t)$ составит (по теореме умножения):

$$F(t) = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_m = \prod_{i=1}^m q_i. \quad (4.10)$$

Поэтому безотказность системы с параллельно резервированными элементами будет:

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i). \quad (4.11)$$

При одинаковой вероятности безотказной работы элементов выражение (4.11) примет вид:

$$P(t) = 1 - (1 - p_i)^m. \quad (4.12)$$

Например, если вероятность безотказной работы каждого элемента $p_i = 0,9$, а $m = 3$, то $P(t) = 1 - (1 - 0,9)^3 = 0,999$. Таким образом, вероятность безотказной работы технической системы резко повышается и становится возможным создание надежных систем из ненадежных (менее надежных) элементов.

Возможно также создание *ненагруженного резервирования* (резервирования замещением), когда резервные цепи находятся в автономном состоянии и включаются лишь в том случае, если основная цепь или элемент отказывает (рисунок 4.5, б). Для обнаружения отказа необходим специальный прибор, а для включения резерва – соответствующее устройство. При резервировании подобного рода один элемент находится под нагрузкой, а остальные n элементов используются как ненагруженный резерв. В отличие от системы с параллельным соединением элементов, в которой функционируют все элементы, элементы ненагруженного резерва бездействуют.

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из $(n + 1)$ элементов, один из которых функционирует, а n остальных находятся в состоянии ненагруженного резерва до момента выхода из строя нагруженного элемента, определяется как:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!}. \quad (4.13)$$

Это выражение справедливо, если (1) переключающее устройство является идеальным; (2) все элементы идентичны; (3) интенсивности отказов элементов постоянны; (4) резервные элементы имеют такие же характеристики, как и новые; (5) отказы элементов статистически независимы.

В случае $(n + 1)$ неодинаковых элементов с различными распределениями наработки плотность распределения безотказной работы системы с ненагруженным резервом имеет вид:

$$f(t) = \int_{y_n=0}^t \int_{y_{n-1}=0}^{y_n} \dots \int_{y_1=0}^{y_2} f_1(y_1) f_2(y_2 - y_1) f_{n+1}(t - y_n) dy_1 dy_2 \dots dy_n. \quad (4.14)$$

Вероятность безотказной работы данной системы можно получить, интегрируя функцию $f(t)$ в интервале $[t, \infty]$:

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t). \quad (4.15)$$

Таким образом, для нагруженного резерва надежность резервных элементов не зависит от того, в какой момент времени они включились вместо основного. Ненагруженные резервные элементы не работают до момента их включения вместо основного элемента, т. е. в этот период их отказ невозможен.

Существует также *облегченный резерв*, когда резервные элементы до момента включения находятся в облегченном режиме работы и вероятность их отказа в этот период мала.

Рассматривая систему, состоящую из n последовательно соединенных элементов, можно предложить несколько вариантов их резервирования. *Общее резервирование* (см. рисунок 4.6, а), когда при выходе из строя любого элемента включается резервная цепь, которая полностью заменяет другую.

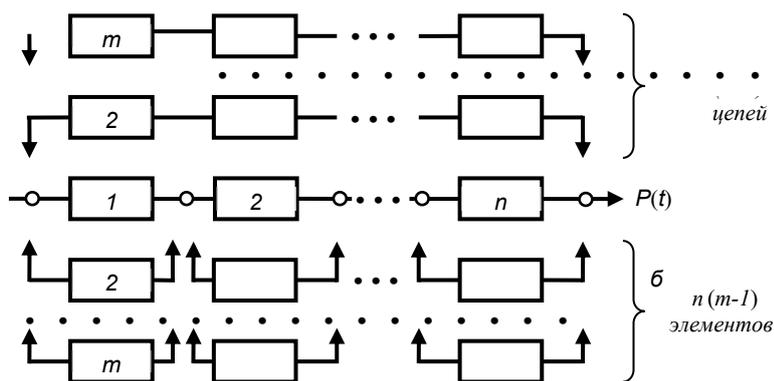


Рисунок 4.6 – Схема общего (а) и отдельного (б) резервирования системы

Имеем $(m - 1)$ резервных цепей (всего m цепей). Если p_i – вероятность безотказной работы одного элемента, а P_j – всей цепи, то безотказность системы P_0 , согласно формулам (4.1), (4.6) и (4.11), будет:

$$P_0(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j) = 1 - \prod_{j=1}^m \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i \right). \quad (4.16)$$

При одинаковых по безотказности элементах формула (4.16) будет иметь вид:

$$P_0(t) = 1 - (1 - p_i^n)^m. \quad (4.17)$$

Например, при $n = 4$, $m = 3$ и $p_i = 0,9$ по формуле (4.17) имеем

$$P_0 = 1 - (1 - 0,9^4)^3 = 0,958.$$

Отдельное резервирование, при котором имеется возможность включить резервный элемент при выходе из строя любого элемента, значительно повышает надежность системы (см. рисунок 4.6, б). В этом случае вероятность безотказной работы системы вычисляется по формуле:

$$P_p(t) = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_i) \right]. \quad (4.18)$$

При одинаковых элементах формула (4.18) примет следующий вид:

$$P_p = [1 - (1 - p_i)^m]^n. \quad (4.19)$$

Используя данные из приведенного выше примера, получим $P_p = [1 - (1 - 0,9)^3]^4 = 0,999^4$, что соответствует высокому уровню безопасности системы. Однако следует заметить, что отдельное резервирование приводит к усложнению всей системы, что, собственно, снижает эффект от ее применения.

На практике наибольшее распространение получило сочетание различных видов резервирования, так называемое *комбинированное (смешанное) резервирование*, которое позволяет осуществлять резервирование слабых по надежности блоков и тем самым уменьшить вероятность отказов.

Рассмотрим невосстанавливаемую систему, у которой (*a*) основных блоков не имеют резервирования, а (*b*) имеют отдельное постоянное резервирование (рисунок 4.7).

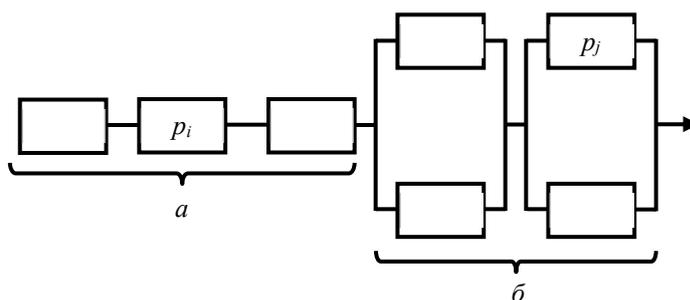


Рисунок 4.7 – Комбинированное (смешанное) соединение блоков

Для приведенной системы вероятность безотказной работы будет вычисляться по формуле:

$$P_c = \prod_{i=1}^a p_i(t) \cdot \prod_{j=1}^b \{ 1 - [1 - p_j(t)]^2 \}. \quad (4.20)$$

Если $p_i(t) = p_j(t) = p(t)$, то

$$P_c = p^a(t) \{ 1 - [1 - p(t)]^2 \}^b. \quad (4.21)$$

Резерв бывает восстанавливаемый и невосстанавливаемый в зависимости от того, подлежит или не подлежит восстановлению его работоспособность в случае отказа.

Резервирование с восстановлением называется резервирование, при котором работоспособность любого основного и резервного эле-

ментов объекта в случаях возникновения их отказов подлежит восстановлению в процессе эксплуатации объекта. В противном случае будет *резервирование без восстановления*.

Повышение надежности подверженных старению технических систем в процессе их эксплуатации может быть обеспечено только *резервированием методами ремонта*:

- нагруженным эксплуатационным резервированием – повышением ремонтпригодности изделия до уровня, исключающего образование критических дефектов, которые могли бы вызвать неремонтпригодное состояние объекта в течение определенной наработки;
- ненагруженным эксплуатационным резервированием – заменой отказавших элементов системы на ремонтные комплекты.

Знание основного закона повышения надежности технических систем, подверженных старению, позволяет обоснованно и более эффективно использовать потенциальные возможности ремонта машин в современном промышленно развитом обществе. Таким образом, методами ремонта не только устраняются отказы машин, но и достигается возможность увеличения наработки до предельного состояния, обеспечивающая повышение эффективности техники за счет обоснованного выбора эксплуатационного резервирования.

Эксплуатационное резервирование обеспечивает повышение надежности технических систем за счет введения избыточности. Введение избыточности означает, что при изготовлении и (или) ремонте машин предусматриваются дополнительные устройства, технические мероприятия и средства сверх минимально необходимых для выполнения системой заданных функций.

Нагруженное эксплуатационное резервирование осуществляется в процессе разработки конструкции системы и достигается повышением уровня ремонтпригодности путем введения избыточности, исключающей возможность образования критических дефектов, способных привести к неремонтпригодному состоянию системы или ее основных элементов в течение основной наработки. В данном случае повышение уровня ремонтпригодности достигается увеличением наработки системы до предельного состояния и превышающей по величине наработку, назначенную на стадии конструирования.

Ненагруженное эксплуатационное резервирование предусматривает создание избыточности за счет заранее изготовленных ремонтных комплектов, которые используются для замены отказавших элементов системы.

Таким образом, резервирование, повышая надежность технических систем, приводит к их усложнению и удорожанию. Поэтому целесообразность применения резервирования в каждом отдельном случае должна оцениваться с учетом его экономической эффективности, а также с учетом требований, предъявляемых к объекту с точки зрения безотказности. Так, например, создание двух независимых тормозных контуров (на передние и задние колеса) у автомобиля ведет к его усложнению и удорожанию, но оправдано требованиями безопасности движения.

Пример 4.1. Предположим, что для работы системы с последовательным соединением элементов при полной нагрузке необходимы два разнотипных насоса. Причем насосы имеют постоянные интенсивности отказов, равные соответственно $\lambda_1 = 0,0001 \text{ ч}^{-1}$ и $\lambda_2 = 0,0002 \text{ ч}^{-1}$. Требуется определить среднее время и вероятность безотказной работы данной системы в течение 100 ч. Предполагается, что оба насоса начинают работать в момент времени $t = 0$.

Решение. С помощью формулы (4.4) находим вероятность безотказной работы заданной системы в течение $t = 100$ ч:

$$P(100) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} = e^{-(0,0001 + 0,0002) \cdot 100} = 0,97045.$$

Используя формулу (4.5), получим:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{1}{0,0001 + 0,0002} = 3333,3 \text{ ч.}$$

Ответ: $\bar{T}_0 = 3333,3 \text{ ч}$; $P(t) = 0,97045$.

Пример 4.2. Определить вероятность безотказной работы системы из четырех звеньев (рисунок 4.8, а), если известны значения вероятности безотказной работы каждого звена, которые равны $p_1 = 0,99$; $p_2 = 0,90$; $p_3 = p_4 = 0,96$.

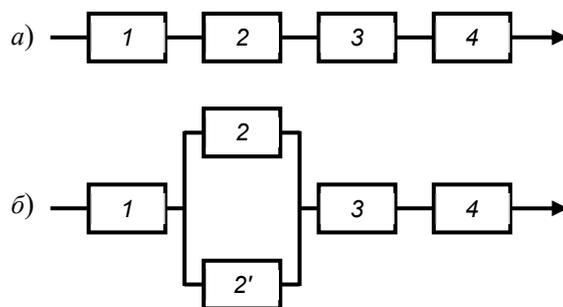


Рисунок 4.8 – Схема для расчета системы из четырех элементов

Решение. Вероятность безотказной работы системы по формуле (4.1) будет равна

$$P(t) = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 = 0,99 \cdot 0,90 \cdot 0,96 \cdot 0,96 = 0,821.$$

Ответ: $P(t) = 0,821$.

Пример 4.3. Определить вероятность безотказной работы системы, приведенной в примере (4.2), за счет дублирования второго элемента, надежность которого значительно ниже остальных элементов (рисунок 4.8, б).

Решение. Вероятность безотказной работы основного и резервного элементов № 2 и № 2' по формуле (4.12) будет:

$$P_{2\text{рез}} = 1 - (1 - p_2)^2 = 1 - (1 - 0,9)^2 = 0,99.$$

Таким образом, надежность резервированного элемента на порядок выше, чем у каждого из пары. Поэтому безотказность работы всей системы возрастает и станет равной

$$P(t) = p_1 \cdot [1 - (1 - p_2)^2] \cdot p_3 \cdot p_4 = 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,96 \cdot 0,96 = 0,90.$$

Ответ: $P(t) = 0,90$.

Пример 4.4. Предположим, что два одинаковых двигателя работают в системе с резервированием, причем если один из них выходит из строя, то другой способен работать при полной системной нагрузке. Требуется найти безотказность системы в течение 400 ч (продолжительность выполнения задания) при условии, что интенсивности отказов двигателей постоянны и равны $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$, отказы двигателей статистически независимы, и оба двигателя начинают работать в момент времени $t = 0$.

Решение. В случае идентичных элементов формула (4.7) принимает следующий вид:

$$P(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}.$$

Поскольку $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$ и $t = 400 \text{ ч}$, то

$$P(400) = 2e^{-0,0005 \cdot 400} - e^{-2 \cdot 0,0005 \cdot 400} = 0,9671.$$

Среднюю наработку на отказ определяем по формуле (4.9):

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} \right) = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\lambda} = \frac{1,5}{0,0005} = 3000 \text{ ч}.$$

Ответ: $P(t) = 0,9671$; $\bar{T}_0 = 3000 \text{ ч}$.

Пример 4.5. Система состоит из двух идентичных устройств, одно из которых функционирует, а другое находится в режиме ненагруженного резерва. Интенсивности отказов обоих устройств постоянны.

Кроме того, предполагается, что в начале работы резервное устройство имеет такие же характеристики, как и новое. Требуется определить вероятность безотказной работы системы в течение 10 ч при условии, что интенсивности отказов данных устройств составляют $\lambda = 0,001 \text{ ч}^{-1}$.

Решение. Используя выражение (4.13), получаем:

$$P(t) = (1 + \lambda t) e^{-\lambda t}.$$

При заданных значениях $t = 10 \text{ ч}$ и $\lambda = 0,001 \text{ ч}^{-1}$ вероятность безотказной работы системы составляет:

$$P(t) = (1 + 0,1) e^{-0,1} = 0,9953.$$

Ответ: $P(t) = 0,9953$.

Пример 4.6. Определить вероятность безотказной работы 4-х схем соединения элементов (рисунок 4.9), если известны значения вероятности безотказной работы элементов $p_1 = 0,8$ (надежный элемент); $p_2 = 0,5$ (ненадежный элемент).

Решение. Вероятность безотказной работы по первой схеме (последовательное соединение) по формуле (4.1) будет

$$P_1 = p_1 \cdot p_2 = 0,8 \cdot 0,5 = 0,4.$$

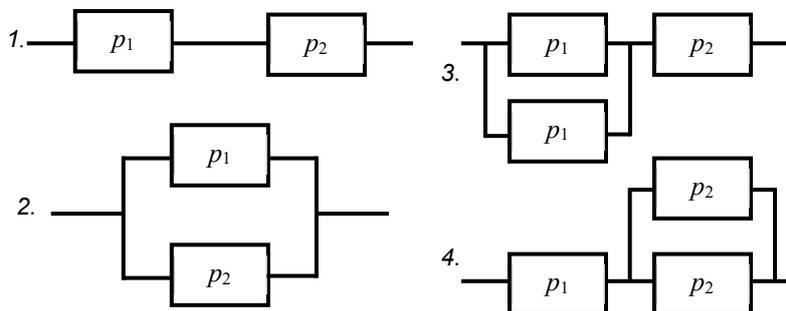


Рисунок 4.9 – К расчету эффективности схем резервирования

По второй схеме (параллельное соединение), используя формулу (4.11), находим:

$$P_2 = 1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) = 1 - (1 - 0,8) \cdot (1 - 0,5) = 0,9.$$

При комбинированном (смешанном) соединении с резервированием надежного (первого) элемента (схема 3) вероятность безотказной работы по формуле (4.17) будет

$$P_3 = [1 - (1 - p_1)^2] \cdot p_2 = [1 - (1 - 0,8)^2] \cdot 0,5 = 0,48.$$

При комбинированном (смешанном) соединении с резервированием ненадежного элемента (схема 4)

$$P_4 = p_2 \cdot [1 - (1 - p_2)^2] = 0,8 \cdot [1 - (1 - 0,5)^2] = 0,6.$$

Ответ: $P_1 = 0,4$; $P_2 = 0,9$; $P_3 = 0,48$; $P_4 = 0,6$.

Приведенный пример позволяет сделать следующие выводы:

1. Вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов «хуже» худшего;
2. Вероятность безотказной работы параллельно соединенных элементов «лучше» лучшего;
3. Резервировать целесообразнее более ненадежный элемент.

Пример 4.7. Требуется определить вероятность безотказной работы и среднюю наработку на отказ системы, состоящей из пяти независимых и одинаковых (идентичных) элементов соединенных по схеме, представленной на рисунке 4.10. При этом известно, что $\lambda = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$, $t = 100 \text{ ч}$ и все элементы начинают работать в момент времени $t = 0$.

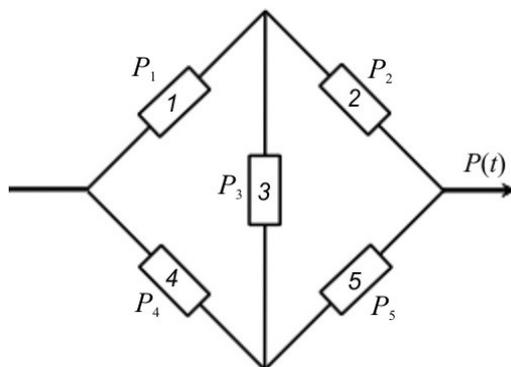


Рисунок 4.10 – Блок-схема системы, состоящей из пяти независимых элементов

Вероятность безотказной работы схемы, состоящей из пяти неодинаковых и независимых элементов, определяется по следующей формуле:

$$P(t) = 2P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 - P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 - P_1 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_4 \cdot P_5 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_5 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 + P_1 \cdot P_3 \cdot P_5 + P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 + P_1 \cdot P_4 + P_2 \cdot P_5.$$

В случае идентичности элементов системы эта формула принимает вид:

$$P(t) = 2P^5 - 5P^4 + 2P^3 + 2P^2. \quad (4.22)$$

Подставляя соотношение (4.3) в формулу (4.22), получаем, что в случае элементов с постоянной интенсивностью отказов

$$P(t) = 2e^{-5\lambda t} - 5e^{-4\lambda t} + 2e^{-3\lambda t} + 2e^{-2\lambda t}. \quad (4.23)$$

Тогда, вероятность безотказной работы составит:

$$P(t) = 2e^{-0,25} - 5e^{-0,2} + 2e^{-0,15} + 2e^{-0,1} = 0,9999.$$

Среднюю наработку на отказ \bar{T}_0 определим путем интегрирования выражения (4.23) в интервале $[0, \infty]$:

$$\bar{T}_0 = \int_0^{\infty} (2e^{-5\lambda t} - 5e^{-4\lambda t} + 2e^{-3\lambda t} + 2e^{-2\lambda t}) dt = \frac{49}{60\lambda}. \quad (4.24)$$

Подставляя полученное значение вероятности безотказной работы в формулу (4.24), находим среднюю наработку на отказ:

$$\bar{T}_0 = \frac{49}{60 \cdot 0,0005} = 1633,4 \text{ ч.}$$

Ответ: $P(t) = 0,9999$; $\bar{T}_0 = 1633,4$ ч.

Пример 4.8. Требуется определить вероятность безотказной работы бульдозера за период $t = 2000$ ч по варианту структурно-логической схемы, представленному на рисунке 4.11.

Решение. Вероятность безотказной работы структурной схемы бульдозера будет равна:

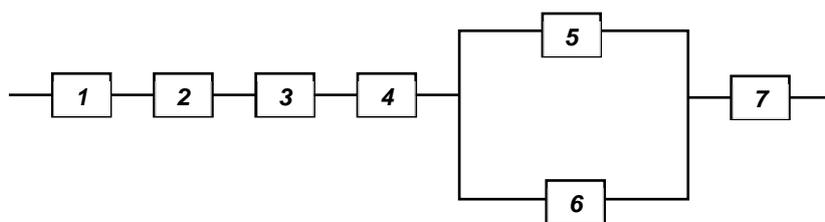


Рисунок 4.11 – Вариант структурной схемы бульдозера:

1 – рама ($P_1 = 0,92$); 2 – двигатель и электрооборудование ($P_2 = 0,85$);
 3 – трансмиссия ($P_3 = 0,70$); 4 – ходовая часть ($P_4 = 0,65$); 5 – рабочее оборудование грейдера ($P_5 = 0,95$); 6 – бульдозерное рабочее оборудование ($P_6 = 0,90$); 7 – гидропривод и система управления ($P_7 = 0,75$)

$$P(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_7 \cdot [1 - (1 - P_5)] \cdot [1 - (1 - P_6)] = \\ = 0,92 \cdot 0,85 \cdot 0,70 \cdot 0,65 \cdot 0,75 \cdot [1 - (1 - 0,95)] \cdot [1 - (1 - 0,90)] = 0,288.$$

Ответ: $P(t) = 0,288$.

Пример 4.9. Система состоит из 20 элементов равной надежности, для которых вероятность безотказной работы за время t_0 равна $P(t_0) = 0,9$. В резерве имеется две таких же системы. Определить, какой способ резервирования целесообразно применить: общее или раздельное резервирование.

Решение. По условиям задачи имеем $n = 20$, $m = 3$. По формуле (4.17) для общего резервирования получим:

$$P_0(t_0) = 1 - (1 - 0,9^{20})^3 = 0,32.$$

При раздельном резервировании (формула 4.19)

$$P'_0(t_0) = [1 - (1 - 0,9)^3]^{20} = (0,999)^{20} = 0,98.$$

Выигрыш надежности при раздельном (поэлементном) резервировании по сравнению с общим резервированием будет равен

$$\frac{P_0}{P'_0} = \frac{0,98}{0,32} \approx 3 \text{ раза.}$$

Ответ: наиболее эффективно раздельное резервирование.

Пример 4.10. Оценить безотказность одноступенчатого редуктора, кинематическая схема которого приведена на рисунке 4.12. Значения вероятностей для корпуса как базового элемента $p_1 = 0,95$, а для остальных элементов, исходя из требования их равной долговечности $p_2 = p_3 = \dots = p_8 = 0,9$. Минимальное допустимое значение вероятности безотказной работы редуктора принять $P_p = 0,9$.

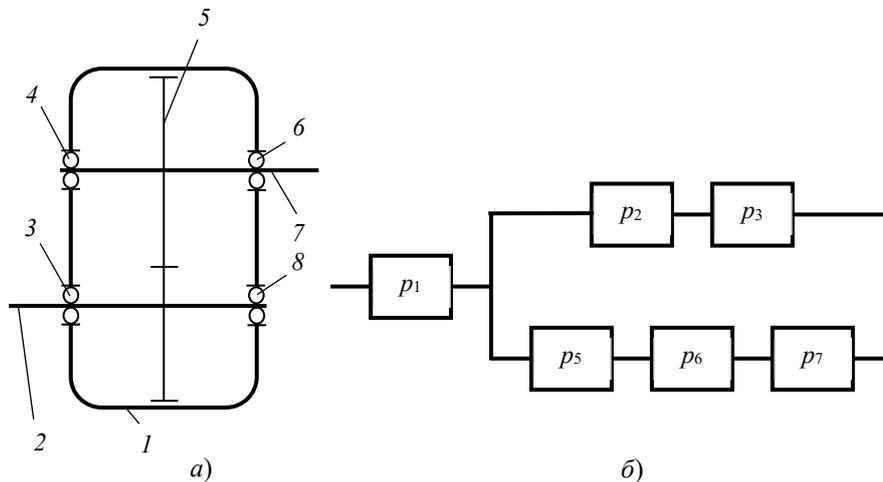


Рисунок 4.12 – Схема одноступенчатого редуктора (а) и структурная схема его надежности (б)

Решение. Критериями предельного состояния редуктора являются предельное состояние корпуса 1, а также сочетания любых двух деталей: входной вал-шестерня 2, колесо 5, выходной вал 7. Эти критерии позволяют сформировать две ремонтные группы, состоящие соответственно из одного и трех элементов. Однако в окончательном варианте структурной схемы надежности редуктора необходимо учесть подшипники 3, 4, 6 и 8.

Как правило, конструкция узлов установки подшипников 4 и 8 позволяет при необходимости выпрессовывать их с минимальными трудозатратами без разборки редуктора. Поэтому данные подшипники в структурную схему не включаются. Что касается подшипников 3 и 6,

то их замена связана с демонтажными работами, объем которых сопоставим с работами по замене соответствующего вала и/или шестерни, и они должны включаться в параллельные звенья ремонтной группы в качестве последовательных элементов со своими валами (шестернями). В окончательном виде структурная схема надежности редуктора показана на рисунке 4.12, б.

Вероятность безотказной работы структурной схемы будет равна:

$$P_c = p_1[1 - (1 - p_2 \cdot p_3) \cdot (1 - p_5 \cdot p_6 \cdot p_7)] = \\ = 0,95[1 - (1 - 0,9 \cdot 0,9) \cdot (1 - 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9)] = 0,901.$$

Так как $P_c = 0,901 > P_p = 0,9$, то надежность редуктора удовлетворяет заданным требованиям надежности сборочных единиц и деталей изделия.

Ответ: $P_c = 0,901$.

4.4. Анализ надежности сложных технических систем с помощью дерева отказов

Понятие дерево отказов возникло в связи с анализом надежности сложных технических систем. Целью построения такого дерева отказов является символическое представление последовательности возникновения условий, приводящих систему к отказу. Для применения метода дерева отказов необходимо представить функциональные взаимосвязи элементов системы в виде сложной схемы, учитывающей взаимную зависимость отказов элементов и групп элементов. Методологическое обеспечение данных подходов состоит в совместном применении методов теории графов, математической логики и теории вероятностей.

Построение дерева отказов для сложной системы предлагает четкое представление о всех функциональных взаимосвязях элементов, причинах их отказов, а также о последствиях этих отказов. Разработана специальная символика для представления деревьев отказов (рисунок 4.13).

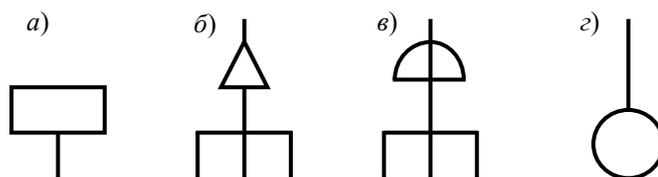


Рисунок 4.13 – Условные обозначения в деревьях отказов:
a – результирующее событие; *б* – схема «ИЛИ»; *в* – схема «И»;
г – первичное событие (отказ)

Вершиной дерева отказов является результирующее событие – полный отказ системы. Промежуточные вершины (узлы графа) представляют собой логические операции типа «И» и «ИЛИ».

Рассмотрим последовательность построения дерева отказов на примере (рисунок 4.14). Событие, заключающееся в появлении отказа, будем обозначать тем же символом, что и вероятность отказа.

Как уже отмечалось построение дерева отказов начинают с главного результирующего события $F_c(t)$, которое заключается в отказе всей системы. Согласно структурной схеме (см. рис.4.14, а) система откажет, когда откажет подсистема из элементов 1, 2, 3 и элемент 4. Следовательно, событие $F_c(t)$ связано с событиями $F_4(t)$ и $F_{1-23}(t)$ по схеме «И». Подсистема из элементов 1, 2, 3 откажет тогда, когда откажут или элемент 1 или подсистема из элементов 2, 3. Поэтому событие $F_{1-23}(t)$ связано с событиями $F_1(t)$ и $F_{23}(t)$ по схеме «ИЛИ». Наконец, подсистема 2, 3 откажет, когда откажут оба элемента. Это значит, что событие $F_{23}(t)$ связано с событиями $F_2(t)$ и $F_3(t)$ по схеме «И».

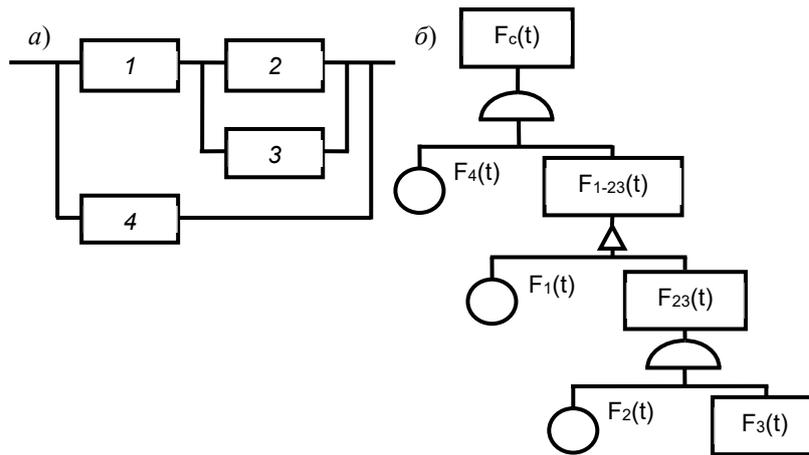


Рисунок 4.14 – Структурные схемы надежности системы (а) и дерево отказов (б)

Изображая графически перечисленные события и связи между ними, получаем дерево отказов (см. рисунок 4.14, б). При наличии дерева отказов легко получить формулы для функции распределения $F_c(t)$ или функции надежности системы $\bar{F}_c(t)$, пользуясь следующими правилами:

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i); \tag{4.25}$$

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)], \tag{4.26}$$

где $P(A)$ – вероятность результирующего события A ; n – общее число событий на входе схемы; $P(A_i)$ – вероятность события A_i на входе соответствующей схемы.

Пользуясь правилами (4.25) и (4.26), найдем формулу для функции надежности $\bar{F}_c(t)$ системы, изображенной на рисунке 4.14, а.

$$\bar{F}_{23}(t) = 1 - [1 - \bar{F}_2(t)][1 - \bar{F}_3(t)];$$

$$\bar{F}_{1-23}(t) = \bar{F}_1(t)\bar{F}_{23}(t);$$

$$\bar{F}_c(t) = 1 - [1 - \bar{F}_{42}(t)][1 - \bar{F}_{3-23}(t)],$$

и окончательно

$$\bar{F}_c(t) = 1 - [1 - \bar{F}_4(t)] \{1 - \bar{F}_1(t) \{1 - [1 - \bar{F}_2(t)][1 - \bar{F}_3(t)]\}\}. \quad (4.27)$$

Машины являются сложными техническими системами, которые должны рассматриваться как единое целое. Объединение различных элементов узлов, механизмов в единую систему придает ей новые свойства, связанные с взаимодействием и взаимовлиянием ее составных частей. Поэтому, для решения проблемы надежности необходимо не только разбиение (разделение) машины на отдельные элементы, но и рассмотрение ее как сложной связанной системы, изучение свойственных ей ошибок функционирования, а также прогнозирование возможного изменения технических характеристик машины с учетом процессов старения и изнашивания.

Таким образом, перечисленные положения являются, по сути, теми фундаментальными представлениями, на которых базируются основные разработки по оценке и обеспечению требуемого уровня надежности сложных высокоэффективных машин (технических систем).

ГЛАВА 5

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

5.1. Характеристика методов повышения надежности машин

Требования к уровню надежности машин постоянно растут и отыскание наиболее рациональных путей решения данной проблемы всегда актуально.

Для существенного повышения надежности машин необходимо проведение комплекса мероприятий, охватывающих сферы проектирования, производства (изготовления) и эксплуатации. Максимальная надежность машин достигается в том случае, когда на каждой стадии решаются свои специфические задачи, а не производится исправление ошибок, допущенных на предыдущих этапах. При этом огромное значение для создания надежных машин и оборудования имеет организация обратных связей, с помощью которых проектировщик получает информацию о фактической надежности машин, режимах их эксплуатации и достигнутом уровне надежности в реальных условиях эксплуатации [3, 11, 12].

Надежность работы машин и оборудования в эксплуатации зависит от ряда факторов, которые условно можно разделить на две группы: *субъективные факторы*, зависящие от индивидуальных особенностей исполнителя-конструктора, изготовителя, эксплуатационника, и *объективные*, характер которых определяется эксплуатационным фоном и случайными воздействиями внешней среды. К числу наиболее существенных субъективных факторов относят выбор конструктивного решения при проектировании машины и комплектующих изделий, подбор материалов деталей, определение рациональных рабочих режимов, организацию технического обслуживания и ремонта машин. К объективным факторам относят различные климатические, почвенные, метеорологические, биологические, механические и другие воздействия.

По характеру влияния на надежность машин различают факторы, снижающие и повышающие уровень надежности. Факторы, повышающие надежность машин, связаны с целенаправленной деятельностью человека, и их относят к числу субъективных факторов. В число факторов, снижающих надежность машин, входят объективные факторы и субъективные, связанные с погрешностями проектирования, изготовления и использования машин.

По характеру возникновения факторы подразделяются на конструктивные, технологические и эксплуатационные. Конструктивные факторы связаны с разработкой и проектированием машин и элементов. Технологические факторы определяются характером процесса изготовления изделий. Эксплуатационные факторы влияют на надежность машин в процессе их работы. Они включают в себя как объективные факторы, обусловленные влиянием внешней среды, так и субъективные, связанные с организацией системы технического обслуживания и ремонтов, обеспечения запасными частями, квалификацией обслуживающего персонала [6, 10].

Методы и возможности повышения надежности весьма разнообразны и связаны со всеми этапами проектирования, изготовления и эксплуатации машин. Проводимые в этой области мероприятия можно разбить на несколько генеральных направлений.

5.2. Конструктивные методы повышения надежности машин

Одно из основных направлений создания высоконадежных объектов – это разработка конструкторской документации.

При разработке конструкторской документации с целью обеспечения надежности создаваемых машин целесообразно выделить следующие основные принципы конструирования.

1. Повышение стойкости изделий к внешним воздействиям. Сюда относятся методы создания прочных, жестких, износостойких узлов за счет их рациональной конструкции и применения материалов со стабильными характеристиками (свойствами). Использование таких материалов позволяет уменьшить размеры и вес как отдельных деталей, так и изделия в целом.

Данное направление объединяет все те новейшие достижения в области конструирования и технологии, которые позволяют увеличивать стойкость узлов и механизмов по отношению к тем воздействиям, которые характерны для данного типа машин.

Важное значение для повышения прочности имеет использование материалов с пониженной чувствительностью к концентрации напряжений. Для деталей, работающих на трение, применяют материалы с высокой твердостью и, следовательно, с высокой износостойкостью. Для антифрикционных материалов очень важным является прирабатываемость, смачиваемость смазочным материалом, возможность са-

мосмазывания. Следовательно, стабильные характеристики применяемых материалов являются важным условием обеспечения надежности изделия.

Для получения таких характеристик материала применяют различные технологические методы. Так, например, для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, жаропрочности и т.п. нашли широкое применение различные способы упрочнения поверхностного слоя деталей.

С целью повышения усталостной прочности и износостойкости используется: пластическое деформирование в виде дробеструйной обработки; обкатка шариками и роликами; гидрополирование, алмазное выглаживание; калибрование шариком; химико-термическая обработка в виде цементации, азотирования; поверхностная закалка; электроискровое и электродуговое упрочнение.

Для защиты от коррозии применяются: химико-термическая обработка в виде азотирования, сульфидирования; защитное гальваническое покрытие (цинковое, никелевое, кадмиевое); лакокрасочные покрытия; пластмассовые покрытия; диффузионная металлизация. Для обеспечения надежности следует создавать и использовать металлоконструкции с оптимальной жесткостью. Необходимо защищать элементы изделия от воздействия вибраций, ударных нагрузок, запыленности, влажности, низких и высоких температур, биологических вредителей и т. д. [4, 7].

2. Использование высоконадежных элементов для создаваемой конструкции. В качестве таковых целесообразно применять унифицированные и стандартизованные детали и узлы, обладающие повышенной надежностью и меньшей стоимостью.

3. Выбор оптимальных конструктивных решений узлов, механизмов, сборочных единиц, обеспечивающих нормальные режимы работы изделия. Во многих случаях добиться повышения надежности машин возможно не только за счет дополнительных затрат на создание специальных устройств и использования новых материалов, но и путем применения рациональных конструктивных решений.

С позиции надежности оптимальной будет такая конструкция машины и ее элементов, когда с наименьшими затратами средств достигается наибольшая продолжительность работы отдельных узлов, механизмов и машины в целом при заданной безотказности и регламентированных затратах на техническое обслуживание и ремонт. При этом в основу выбора рациональных конструктивных решений должны быть

положены расчеты, связывающие изменение выходных параметров изделия с процессами повреждения и методы прогнозирования надежности. Это позволяет находить такие решения, когда износ, усталость, деформация, коррозия и т. п. будут оказывать минимальное влияние на выходные параметры изделия. Кроме того, конструкция машины должна быть также рациональной с точки зрения ее ремонтпригодности и приспособленности к диагностированию.

Такой выбор, прежде всего, основывается на использовании облегченного режима работы, увеличении допустимых отклонений параметров, при которых сохраняется работоспособность агрегата, механизма и т. д., введении элементов защиты, предохраняющих изделие от перегрузок и разрушений. При этом в качестве защитных элементов могут использоваться: плавкие предохранители в системах электроавтоматики, фрикционные и противообгонные муфты, ограничители грузоподъемности и грузового момента, централизованные смазочные системы с терморегулирующими устройствами, обеспечивающими работоспособность машин при низких температурах.

4. Обеспечение максимальной взаимозаменяемости деталей, узлов и механизмов. По мере возможности следует максимально сократить регулировочные работы, предусмотреть в конструкции фиксирующие элементы, обеспечивающие правильную установку деталей и узлов при сборке.

5. Агрегатирование (модульность) конструкции машины. *Агрегатирование* – это метод компоновки машин из агрегатов – унифицированных взаимозаменяемых модулей, выполняющих определенные функции. В качестве примера можно привести унифицированные блочные приводы строительных кранов. Агрегатирование удешевляет машину, повышает серийность производства, следовательно, стабильность качества элементов, а также приспособленность узлов к модернизации.

6. Оптимальная компоновка механизмов, сборочных единиц на изделии должна обеспечивать возможность легкого доступа к наименее надежным сборочным единицам и удобство осмотра механизмов, нуждающихся в периодических проверках и регулировках, а также замены элементов.

7. Разработка эффективных устройств для очистки воздуха, топлива, масел и рабочих жидкостей.

8. Ограничение опасных последствий отказа. Это требование особенно важно для машин, отказы которых имеют не только экономические последствия, но и представляют угрозу для безопасности людей и

окружающей среды (транспортные средства, грузоподъемные машины и др.).

9. Резервирование отдельных элементов машины. Резервирование является одним из путей повышения надежности. Резервирование осуществляют введением дополнительных элементов, которые обеспечивают работоспособность системы при отказе одного или нескольких элементов. При этом резервирование широко применяется для повышения надежности таких элементов, отказ которых имеет серьезные последствия с точки зрения безопасности.

10. Защита техники от случайных ошибок персонала. Это требование выполняется созданием комфортных условий работы оператора, рациональным расположением органов управления, применением блокировочных устройств и другими конструктивными решениями.

11. Упрощение эксплуатационной документации. В инструкцию по эксплуатации с целью недопущения ошибочных действий обслуживающего персонала необходимо вводить предупреждающие знаки «внимания», по возможности упрощать техническое обслуживание и увеличивать периодичность их проведения.

5.3. Технологические методы повышения надежности машин

Расчетный уровень надежности, заложенный в машину на стадии проектирования, должен быть обеспечен в процессе изготовления деталей и элементов, сборки и регулировки машин. Встречаются случаи, когда технологический процесс изготовления изделий не обеспечивает заданного уровня надежности машин и тем самым губит оригинальное конструктивное решение.

Снижение уровня надежности машин на стадии производства может быть следствием одной из следующих причин: детали изготовлены из материалов, имеющих дефекты или не обеспечивающих заданную прочность; принятый технологический процесс изготовления деталей и их поверхностной обработки не может гарантировать заданный уровень эксплуатационных свойств; в технологическом процессе изготовления деталей допущены нарушения вследствие плохой организации производства, недостаточной квалификации рабочих и т. д.; при изготовлении деталей использовано неисправное или устаревшее оборудование.

Следовательно, технологические методы обеспечения надежности определяются, прежде всего, надежностью самой технологической системы. Цель таких методов – достижение показателей и параметров,

заданных конструкторами при проектировании деталей, агрегатов и машины в целом.

К основным технологическим методам, связанных с обеспечением надежности машин в процессе производства, относятся следующие.

1. Тщательный подбор материалов деталей в соответствии с требованиями технической документации и контроль их качества для своевременного обнаружения скрытых дефектов или несоответствия физико-механических свойств требуемым свойствам.

2. Упрочнение деталей и их рабочих поверхностей путем термической, химико-термической обработки и поверхностного пластического деформирования.

3. Повышение износостойкости и коррозионностойкости деталей за счет нанесения специальных покрытий. Например, хромирование рабочих поверхностей гильз цилиндров и шеек коленчатых валов позволяет повысить ресурс деталей в 2–3 раза при увеличении их стоимости на 4 %.

4. Строгое соблюдение и совершенствование технологии производства. Несоблюдение режимов обработки материалов и деталей приводит к сокращению сроков службы и к снижению надежности изделий. Технологические процессы изготовления деталей должны строго соответствовать технической документации. Контроль за этим осуществляют работники технологической службы и отдела технического контроля.

5. Повышение требований к точности основных размеров деталей и к качеству их поверхности. Повышение точности основных размеров деталей зависит от уровня и технического состояния используемых станков и оборудования. С повышением точности изготовления деталей уменьшаются начальные зазоры в подвижных соединениях и улучшаются условия их смазки, более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что значительно повышает износостойкость деталей и долговечность элементов машин. При этом вид обработки определяется геометрическими параметрами детали, ее материалом и функциональным назначением.

6. Применение автоматизированного оборудования с программным управлением, обеспечивающих высокую точность и стабильность характеристик качества изделий, для изготовления деталей машин. Автоматизация производственных процессов позволяет в значительной степени уменьшить отклонения размеров деталей, обуслов-

ленные субъективными факторами, связанными с участием в производстве человека и в целом увеличить надежность элементов машин и оборудования.

7. Входной, текущий и выходной контроль качества изготовления деталей, введение системы бездефектного изготовления продукции.

Отдельные сборочные единицы выпускают на специализированных предприятиях и на завод-изготовитель они поступают в виде готовых изделий. При производстве данных изделий могут быть допущены отклонения от заданной технологии изготовления, а следовательно, отклонения характеристик от номинального значения. Кроме того, продукция специализированных предприятий может не сразу поступить в производство. Нарушение правил транспортировки и хранения изделий ведет к существенному изменению их свойств. По этим причинам необходимо проводить *входной контроль* комплектующих изделий, поступающих на завод машин.

Текущий контроль качества изделий проводят на различных стадиях изготовления и сборки элементов машин. Методику текущего контроля разрабатывают применительно к конкретным изделиям на основе статистических методов контроля качества.

Значительное повышение качества и надежности элементов машин может быть достигнуто путем введения системы бездефектного изготовления продукции. При этой системе продукция или техническая документация сдается с первого предъявления. При обнаружении хотя бы одного дефекта контролер возвращает продукцию изготовителю для его устранения. Большое значение в этом случае приобретают статистические методы контроля качества продукции. Применение перечисленных выше методов позволяет существенно сократить продолжительность и объем контрольных операций с сохранением необходимой достоверности результатов контроля [7, 8].

8. Введение автоматизированной системы управления производством. Обеспечение уровня надежности, заданного на этапе конструирования, в значительной степени связано с организацией производства.

Существенное повышение уровня организации производства достигается введением автоматизированной системы управления, позволяющей выбрать наиболее рациональный вариант технологического процесса. При этом с помощью ЭВМ рассчитывают режимы резания, технические нормы времени, приспособления, мерительные и сложные режущие инструменты. Кроме того, по материально-техническому обеспечению производства рассчитывают потребность в материалах;

по оперативно-производственному планированию разрабатывают оптимальные варианты сетевых графиков и технологических маршрутов, рассчитывают суточную потребность деталей и учет готовой продукции; по бухгалтерскому учету определяют расход заработной платы, материалов, инструментов и др.

Внедрение автоматизированной системы управления производством позволяет организовать ритмичный выпуск продукции со стабильными характеристиками качества и надежности.

9. Внедрение на предприятиях системы качества. Проблема обеспечения надежности машин на стадии производства в значительной степени сводится к обеспечению качества изготовления, что реализуется на современном этапе внедрением системы качества, которая имеет своей целью не только отбраковать дефектные изделия, но и не допустить их изготовления. Большинство ведущих фирм-изготовителей техники внедряют на своих производствах системы качества, соответствующие MS ISO 9000.

5.4. Обеспечение надежности машин при эксплуатации

Условия эксплуатации машин существенно влияют на показатели их надежности. Для обеспечения высоких показателей долговечности и безотказности машин при эксплуатации необходимы следующие мероприятия.

1. Качественная обкатка новых и отремонтированных машин в эксплуатационной организации. Ее необходимо проводить в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей или ремонтных предприятий. По завершении обкатки снимают ограничение мощности и проводят первое техническое обслуживание с заменой смазочных материалов в двигателе, агрегатах трансмиссии и ходовой части.

2. Совершенствование организации технического обслуживания и создание для его проведения необходимой материально-технической базы.

Организационные и технологические факторы, определяющие условия эксплуатации, являются тем фоном, на котором проявляются свойства надежности, заложенные в конструкции машин. В системе технической эксплуатации машин применяют различные организационные формы технического обслуживания.

Система технического обслуживания включает комплекс мероприятий, направленных на поддержание работоспособности машин в

процессе эксплуатации. Оптимизация периодичности технических обслуживаний и своевременное проведение профилактических мероприятий, направленных на восстановление первоначальных свойств, строгое обоснование объемов работ и бесперебойное снабжение эксплуатационных предприятий запасными частями и материалами – все это позволяет в значительной мере повысить безотказность и долговечность машин в эксплуатации и в конечном итоге увеличить их надежность.

Высокие показатели надежности машин характерны для эксплуатационных предприятий, располагающих современными стационарными пунктами технического обслуживания, передвижными диагностическими станциями, станциями для заправки и технического обслуживания машин в полевых условиях, звеньями мастеров-наладчиков, применяющих моечное, смазочное, диагностическое и регулировочное оборудование, средства механизации.

3. Проведение периодических технических осмотров машин, способствующих улучшению деятельности инженерно-технических служб эксплуатационных предприятий, хранения машин и повышению уровня их эксплуатации и надежности. Периодические технические осмотры проводят представители Гостехнадзора и ГИБДД один-два раза в год.

4. Строгое соблюдение рекомендаций заводов-изготовителей по применению топлив, масел, смазочных материалов и жидкостей гидросистем. Данные рекомендации установлены в результате тщательных исследований, и несоблюдение их в эксплуатации значительно снижает долговечность и безотказность машины.

Существенно влияет на надежность машин качество применяемых смазочных материалов. При использовании некачественных масел в двигателях образуется большое количество смолистого шлака и твердых продуктов сгорания, которые откладываются на деталях поршневой группы, системы смазки, во внутренних полостях и деталях двигателя. При этом на поверхностях поршней образуется большое количество нагара и плотная окисная пленка, что приводит к резкому ухудшению работы маслоъемных колец, увеличению пропуска масла к компрессионным кольцам и в камеру сгорания, к повышенному расходу масла и прогрессивному нагарообразованию.

Ухудшение условий смазки ведет к возникновению задиров на трущихся поверхностях деталей поршневой группы и интенсивному образованию продуктов износа. Быстрое загрязнение фильтров продук-

тами износа и абразивными частицами приводит к тому, что к подшипникам коленчатого вала через перепускной клапан поступает нефiltroванное масло, в результате чего на вкладышах подшипников образуются риски и задиры. Поэтому для обеспечения требуемых свойств смазочных материалов необходимо применять различные композиции присадок, обладающих противоизносными, антиокислительными и моющими свойствами.

Заправка гидросистем жидкостями, не предусмотренными инструкцией по эксплуатации, является также наиболее распространенным нарушением и приводит к отказам элементов и выходу машины из строя.

5. Контроль и обеспечение достаточной герметизации агрегатов и механизмов машин. Во время эксплуатации машин герметизация нарушается вследствие ослабления крепления крышек, низкого качества прокладочных материалов, коробления плоскостей разъемов корпусных деталей, износа уплотнительных устройств.

6. Соблюдение установленных правил транспортировки и хранения машин. Последнее особенно важно для машин сезонного использования.

Высокая сохраняемость техники обеспечивается при наличии специальных помещений, площадок с твердым покрытием, использовании различных подставок и прокладок, своевременной очистке машин от технологических загрязнений и почвы, герметизации двигателя, нанесении защитных смазок, своевременном восстановлении лакокрасочных покрытий, снятии и хранении в закрытых помещениях электрооборудования, резинотехнических изделий, приборов, сменного рабочего оборудования и т. д.

7. Повышение уровня квалификации обслуживающего персонала, выполнения механизированных работ и инженерной службы эксплуатационного предприятия.

Квалификацией обслуживающего персонала определяется качество подготовки машины к работе, ее техническое состояние, а также качество технического обслуживания машин. Высокая квалификация позволяет значительно быстрее обнаружить и устранить отказы, возникшие в процессе работы машины. Влияние недостаточной квалификации персонала уменьшается с введением централизованной системы смазки, уменьшением числа быстроизнашивающихся элементов, требующих замены или регулировки. Несоблюдение обслуживающим персоналом правил технической эксплуатации машин всегда приводит к отказам и неисправностям, а в ряде случаев и к авариям.

8. Совершенствование системы сбора, обработки и анализа информации о надежности машин, разработка рекомендаций по повышению надежности машин и их элементов.

Система сбора и обработки информации об отказах и неисправностях машин и оборудования косвенно влияет на их надежность. Оперативная информация о числе и характере отказов элементов машин, работающих в различных условиях эксплуатации, должна систематически поступать на завод-изготовитель. При этом анализ собранной информации позволяет установить скрытые причины отказов и быстро принять необходимые меры по улучшению конструкции и совершенствованию технологии изготовления наименее надежных элементов машины. При эксплуатации машин необходимо не только поддерживать уровень надежности, заложенный в машине, но и проводить мероприятия, направленные на совершенствование конструкции и повышение надежности.

Условия эксплуатации существенно влияют на надежность машин. Вследствие этого при использовании машин в особых условиях (сложных климатических, на особо тяжелых рабочих режимах и др.) необходимо проводить мероприятия, компенсирующие влияние особенностей эксплуатации (например, изменение периодичности и состава мероприятий технического обслуживания).

Разработка рекомендаций, направленных на повышение надежности машин и их элементов, и строгое научное обоснование эксплуатационных мероприятий возможно только на базе объективной информации о работе и техническом состоянии машин.

5.5. Повышение надежности машин при ремонте

К основным направлениям повышения надежности отремонтированных машин относятся следующие.

1. Проведение предремонтного диагностирования в мастерских организаций для определения необходимых ремонтных воздействий и разборки соответствующих агрегатов машин. При этом прогнозируют техническое состояние и показатели надежности машин.

2. Обеспечение сохранности ремонтного фонда, поступающего на ремонтные предприятия, достигается организацией складов и площадок, использованием специальных подставок и подкладок, антикоррозионных смазочных материалов и других средств. При неудовлетворительном хранении ремонтный фонд может быть превращен в металлолом.

3. Выполнение разборочных работ без повреждения деталей и разукomплектовки соответствующих пар. Для исключения повреждения деталей при разборке следует использовать съемники, прессы, стенды и другие средства механизации. Наибольшее распространение получили винтовые и гидравлические съемники. При демонтаже подшипников качения нельзя передавать усилие на кольца через тела качения.

Для сохранения комплектов деталей применяют различные контейнеры. Нельзя разукomплектовывать блоки цилиндров и крышки подшипников коленчатого вала, шатуны и их крышки, пары зубчатых колес конечных и других передач.

4. Выполнение на ремонтных предприятиях качественной очистки машин, агрегатов и деталей от различных загрязнений. Удаление накипи, нагара, асфальтосмолистых и других загрязнений отличается определенными трудностями и требует использования современного оборудования, новых моющих средств, обеспечения соответствующих режимов очистки. Так, при высококачественной наружной очистке и промывке масляных каналов в блоке и коленчатом вале можно увеличить ресурс двигателя ЯМЗ-240 на 25...30 %.

5. Контроль и дефектация деталей. На ремонтных предприятиях следует расширить номенклатуру деталей, подвергаемых сплошному контролю. Наряду с универсальными измерительными инструментами (микрометрами, индикаторами) следует широко использовать предельные (пробки, калибры, скобы) инструменты и средства пневматического контроля, обеспечивающие повышение точности измерений до 0,01...0,001 мм.

Коленчатые валы и оси, поворотные цапфы, блоки, гильзы цилиндров и другие детали проверяют на отсутствие скрытых дефектов методами магнитной, люминесцентной, ультразвуковой дефектоскопии и гидравлической опрессовки.

Блоки цилиндров, корпуса коробок передач и трансмиссий и другие базисные детали требуют сплошного контроля не только размеров, но и геометрии их рабочих поверхностей и точности их взаимного расположения, так как во время эксплуатации у этих деталей в результате старения материала, изнашивания, воздействия различных нагрузок и перераспределения внутренних напряжений изменяются размеры, геометрическая форма и взаимное расположение рабочих поверхностей.

Устранение обнаруженных отклонений обеспечивает высокий ресурс не только самой базовой детали, но и всего агрегата.

6. Введение на ремонтных предприятиях входного контроля запасных частей, так как встречаются случаи несоответствия их размеров, геометрической формы, твердости и других параметров чертежам и техническим требованиям.

7. Подбор деталей цилиндропоршневой группы (поршней, шатунов, поршневых пальцев) по массе.

8. Динамическая балансировка коленчатых и карданных валов, сцепления, колес автомобилей и других деталей и сборочных единиц.

9. Обеспечение регламентированных зазоров и натягов в соединениях, усилий затяжки резьбовых соединений и других требований при сборке агрегатов и машин. Так, зазор между шейкой и вкладышем коленчатого вала двигателя ЯМЗ-240 должен быть 0,056...0,114 мм. Превышение этого зазора при сборке приводит к снижению ресурса двигателя, а уменьшение – к задиру вкладышей при обкатке двигателя.

10. Обеспечение хорошей герметизации агрегатов и сборочных единиц. Для этого заменяют прокладки и сальниковые уплотнения, устраняют коробление плоскостей разъемов деталей, восстанавливают резьбовые соединения, используют новые прокладочные материалы типа жидкой прокладки и др.

11. Внедрение стендовой обкатки и испытаний агрегатов и машин. Обкатывают под нагрузкой не только двигатели, но и агрегаты трансмиссии, применяют обкаточные масла и различные присадки.

12. Повышение качества окраски ремонтируемых машин за счет лучшей подготовки окрашиваемых поверхностей, применения эффективных грунтов и эмалей, окраски отдельно агрегатов и машин в сборе, внедрения прогрессивных методов окраски гидродинамическим распылением, в электростатическом поле и др.

5.6. Экономическая эффективность мероприятий по повышению надежности машин

Основным критерием оценки экономической эффективности мероприятий по повышению надежности машин является сумма приведенных затрат в сфере производства и эксплуатации. При проведении модернизации машины, направленной на повышение ее надежности, появляются дополнительные затраты в сфере производства. Однако эти затраты, как правило, быстро окупаются в сфере эксплуатации путем повышения эффективности использования машин. Решение о целесообразности проведения мероприятия, направленного на повышение

надежности машины, принимают в зависимости от экономического эффекта, определяемого на объем производства (число выпускаемых машин данной марки) в расчетном году (годовой экономический эффект).

Годовой экономический эффект от проведения мероприятия представляет собой суммарную экономию всех производственных ресурсов (материалов, капитальных вложений), которую получает народное хозяйство в результате производства и эксплуатации машин повышенной надежности. Определение годового экономического эффекта основывают на сопоставлении приведенных затрат по двум вариантам машины: по базовому, существующему в настоящее время, и по новому (повышенной надежности).

Приведенные затраты на единицу продукции (машину) (в руб.) представляют собой сумму себестоимости и нормативной прибыли:

$$Z = C + E_n \cdot K, \quad (5.1)$$

где C – себестоимость единицы продукции, руб.; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; K – удельные капитальные вложения в производственные фонды, руб.

В соответствии с «Методикой определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» значение нормативного коэффициента принимают единым для всех отраслей машиностроения ($E_n = 0,15$).

При оценке целесообразности проведения мероприятия и определении годового экономического эффекта сравниваемые варианты надо сопоставлять по следующим факторам: производительности, качественным параметрам, надежности, социальным факторам производства и эксплуатации, включая влияние на окружающую среду. Кроме того, при расчете годового экономического эффекта необходимо учитывать фактор времени, характеризующий развитие техники и технологии производства.

Фактор времени рассчитывают путем приведения к одному моменту (началу расчетного года) единовременных и текущих затрат на производство и эксплуатацию машины до и после осуществления мероприятия.

Это приведение производится умножением (делением) затрат и результатов соответствующего года на коэффициент приведения:

$$a_t = (1 + E)^t, \quad (5.2)$$

где E – норматив приведения ($E = 0,1$); t – число лет, отделяющее затраты данного периода от начала расчетного года.

Годовой экономический эффект от проведения мероприятия, направленного на повышение надежности машин и их основных элементов, имеющих срок службы более одного года:

$$\Theta = \left[3_1 \cdot \frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} + \frac{(I'_1 - I'_2) - E_n(K'_2 - K'_1)}{P_2 + E_n} \cdot 3_2 \right] \cdot A_2, \quad (5.3)$$

где $3_1, 3_2$ – приведенные затраты на машину соответственно до и после проведения мероприятия, определяемые по формуле (8.1), руб.; B_1, B_2 – годовые объемы работ, выполняемые данной машиной до и после проведения мероприятия, в натуральных единицах; $\frac{B_2}{B_1}$ – коэффициент, учитывающий повышение производитель-

ности машины при проведении мероприятия; P_1, P_2 – доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) машины до и после проведения мероприятия, рассчитываемые как величины, обратные срокам службы машин с учетом их морального износа; $\frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n}$ – коэффициент учета изменения срока

службы машины после проведения мероприятия; K'_1, K'_2 – сопутствующие капитальные вложения потребителя (без учета стоимости средств труда) при эксплуатации машин, выпущенных до и после проведения мероприятия в расчете на объем работ, выполняемых новой машиной, руб.; I'_1, I'_2 – годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании машин, выпущенных до и после проведения мероприятия в расчете на объем работы, выполняемой новой машиной (при определении I_1 и I_2 не учитывают средства на реновацию и амортизационные отчисления по сопутствующим капитальным вложениям потребителя), руб.; $\frac{(I'_1 - I'_2) - E_n(K'_2 - K'_1)}{P_2 + E_n}$ – экономия потребителя на текущих издержках эксплуа-

тации и отчислениях от соответствующих капитальных вложений за весь срок службы машины в результате проведения мероприятия; A_2 – объем производства машин данного образца в расчетном году, в натуральных единицах.

Годовой экономический эффект от производства и использования новых элементов машин со сроком службы менее одного года (топливо, смазочные материалы, быстроизнашивающиеся детали):

$$\Theta = \left[3_1 \cdot \frac{Y_1}{Y_2} + \frac{(I'_1 - I'_2) - E_n(K'_2 - K'_1)}{Y_2} \cdot 3_2 \right] \cdot A_2, \quad (5.4)$$

где Y_1, Y_2 – удельные расходы соответственно базового и нового элемента в расчете на единицу работы, выполняемой машиной, в натуральных единицах.

Характерной чертой машин является возможность их использования на различных работах и в различных условиях эксплуатации.

Годовой экономический эффект от проведения мероприятия, направленного на повышение надежности машины, используемой в нескольких сферах потребления:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i \cdot A_i, \quad (5.5)$$

где \mathcal{E}_i – годовой экономический эффект от производства и использования машины в i -й сфере потребления, руб.; A_i – часть выпуска машин, предназначенная в расчетном году для использования в i -й сфере потребления, в натуральных единицах; n – число сфер потребления машин данного типа.

При определении годового экономического эффекта в составе капитальных вложений изготовителя и потребителя техники учитывают как непосредственные капитальные вложения, так и другие единовременные затраты, необходимые для разработки и внедрения мероприятий: затраты на научно-исследовательские работы, на опытно-конструкторские разработки, на проведение испытаний и др.

Планируемая и фактическая экономия капитальных вложений на расчетный год внедрения новой машины или оборудования (в руб.) в результате проведения мероприятия:

$$\Delta K_3 = (K_1 \frac{B_2}{B_1} - K_2) \cdot A_2, \quad (5.6)$$

где K_1, K_2 – удельные капитальные вложения до и после проведения мероприятия, руб.; B_1, B_2 – годовые объемы работы, выполняемой при использовании машин, выпускаемых до и после проведения мероприятия, в натуральных единицах.

Планируемое и фактическое снижение материальных затрат в t -м году в результате проведения мероприятия и повышения надежности машины:

$$\Delta M_t = (M_1 - M_t) \cdot A_t, \quad (5.7)$$

где M_1, M_t – материальные затраты на единицу продукции в t -м году и в году, предшествующем внедрению мероприятия, руб.; A_t – объем производства в t -м году, в натуральных единицах.

Приведенная методика определения экономической эффективности мероприятий, направленных на повышение надежности машин,

позволяет оценить экономическую эффективность на стадиях проектирования, производства и эксплуатации машины.

Таким образом, обеспечение необходимого уровня надежности машины осуществляется, как правило, с использованием вышеперечисленных методов. При этом выбор наиболее рациональных решений, прежде всего, зависит от полноты и достоверности информации о надежности машины. Основную ценность будет представлять информация, полученная на ранних стадиях создания машины. В результате этого становится возможным установить основные факторы, определяющие требуемый уровень надежности.

В большинстве случаев реальная ситуация при проектировании машины такова, что характеристики ее надежности определяются приблизительно, т. е. нет гарантии соблюдения их значений при использовании машины. В этом случае только статистика после длительной эксплуатации большого числа машин данного типа позволит выявить действительные показатели надежности.

Поэтому расчет, прогнозирование и обеспечение показателей надежности машины, нормирование скоростей протекания процессов старения и изнашивания, определение на стадии проектирования области состояния машины – все это необходимо учитывать при решении задач надежности. При этом разработка эффективных методов оценки и обеспечения требуемого уровня надежности также является необходимым условием для создания надежных и конкурентоспособных машин. Таким образом, создание машин, сохраняющих свою надежность в течение всего периода эксплуатации – одно из основных направлений машиностроительной отрасли.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ

Глава 1

1.1. Что понимают под обеспечением надежности машин? Сформулируйте основные направления стандартизации в области надежности машин.

1.2. Дайте определение надежности машин. Какие свойства включает понятие надежности объекта? В чем различие свойств безотказности и долговечности объекта?

1.3. Перечислите состояние объекта с точки зрения надежности. Когда наступает неработоспособное состояние объекта (технической системы)?

1.4. Возможна ли дальнейшая эксплуатация объекта при достижении им предельного состояния?

1.5. Поясните разницу между восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми объектами.

1.6. Что такое отказ? Каковы его разновидности в зависимости от причин возникновения, характера проявления, группы сложности, взаимосвязи и способа обнаружения?

1.7. В чем отличие понятия «отказ» от понятия «повреждение»? В результате каких основных процессов возникают отказы элементов машин?

1.8. Назовите перечень (характер) отказов элементов машин. Какие отказы характерны для сельскохозяйственных машин?

1.9. Приведите классификацию показателей надежности. Перечислите оценочные показатели надежности машин.

1.10. Какими показателями оценивается безотказность объекта? Дайте краткую их характеристику и приведите примеры расчета.

1.11. Что такое долговечность объекта? Перечислите и дайте определение показателей долговечности. Что понимают под ресурсом, гамма-процентным ресурсом и сроком службы?

1.12. Какие основные и вспомогательные показатели используют для оценки ремонтпригодности объекта? Задайтесь условными исходными данными и решите задачи по определению этих показателей.

1.13. Перечислите показатели сохраняемости объекта. Показателями какого свойства объекта они соответствуют по своей сути?

1.14. Назовите и дайте определение комплексных показателей надежности машин. Как определяют коэффициенты готовности и технического использования? Приведите примеры расчета.

1.15. Почему у невосстанавливаемых объектов совпадают значения наработки до отказа и среднего ресурса? Почему не совпадают значения аналогичных показателей у восстанавливаемых объектов (наработка на отказ и средний ресурс)?

Глава 2

2.1. Какие физические процессы вызывают снижение надежности машин в эксплуатации?

2.2. Приведите и охарактеризуйте структуру физико-вероятностной модели.

2.3. Объясните схему формирования отказа изделия для одного из выходных параметров.

2.4. Модель проявления постепенных и внезапных отказов.

2.5. Что изучает научная дисциплина – трибоника? Какие существуют виды трения рабочих поверхностей деталей?

2.6. Какие основные виды взаимодействия рабочих поверхностей деталей различают в теории трения? Назовите факторы, определяющие характер трения.

2.7. Какие различают виды трения в зависимости от толщины пленки смазочного материала? Как они проявляются в типовых узлах трения сельскохозяйственных машин?

2.8. Приведите примеры, когда один вид трения может переходить в другой. Как этот переход может влиять на работу узла трения?

2.9. Перечислите основные виды смазки. Что показывает диаграмма Герси-Штрибека?

2.10. Что называют изнашиванием? Назовите основные количественные характеристики изнашивания деталей машин. Являются ли характеристики изнашивания постоянными величинами?

2.11. Какие основные характеристики необходимо знать для оценки и обеспечения надежности элементов машин при изнашивании?

2.12. Что такое износостойкость? Как связаны между собой скорость и интенсивность изнашивания?

2.13. Перечислите основные факторы, влияющие на характер и интенсивность изнашивания деталей машин.

2.14. Приведите наиболее распространенные сочетания материалов для различных пар трения.

2.15. Перечислите основные классы износостойкости, используемые для прогнозирования надежности при износе элементов машины.

2.16. Какие основные модели изнашивания вы знаете? Какова наиболее общая модель изнашивания элементов машин?

2.17. Назовите и кратко охарактеризуйте основные методы определения величины износа деталей машин.

2.18. Какие виды изнашивания различают в соответствии с действующей классификацией?

2.19. Каков механизм усталостного изнашивания поверхностей деталей? Что такое питтинг?

2.20. Поясните механизм изнашивания при заедании. Что такое «схватывание»?

2.21. В чем сходство и различие абразивного и усталостного изнашивания?

2.22. Как можно повысить абразивную износостойкость поверхности детали?

2.23. Перечислите основные мероприятия по снижению интенсивности абразивного изнашивания элементов машин.

2.24. Назовите виды коррозионно-механического изнашивания рабочих поверхностей деталей. Чем обусловлено окислительное изнашивание? Каково его влияние на работу узлов трения?

2.25. Сущность водородного изнашивания. Что такое «избирательный перенос»?

2.26. Какой вид изнашивания является наиболее разрушительным?

2.27. Приведите классификацию соединений по условиям их изнашивания.

Глава 3

3.1. Как организуют сбор и обработку статистической информации о надежности? Какие требования предъявляются к совокупности наблюдаемых объектов?

3.2. Возможность решения каких задач обеспечивают результаты сбора и обработки информации о надежности машин и оборудования?

3.3. Когда эксплуатацию заданного числа машин называют подконтрольной?

3.4. Какие основные источники используются для сбора информации о надежности машин?

3.5. Перечислите формы учетной документации для сбора и обработки информации о надежности машин.

3.6. Назовите основные методы сбора информации о надежности машин в эксплуатации.

3.7. Укажите особенности инструментального метода сбора информации о надежности машин.

3.8. Для чего используют метод хронометража при сборе информации о надежности машин?

3.9. В каких случаях применяют метод периодических наблюдений при сборе информации о надежности машин?

3.10. Назовите особенности метода сбора информации о надежности машин, основанного на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации.

3.11. Каков порядок обработки полной информации по показателям надежности? Перечислите основные этапы методики определения количества деталей, годных для дальнейшего использования и требующих восстановления.

3.12. Изложите сущность графических методов обработки информации по показателям надежности.

3.13. Особенности методики обработки многократно усеченной информации.

3.14. В чем сущность прогнозирования остаточного ресурса машин? Приведите графическую схему его определения.

3.15. Дайте определение предельному и допускаемому значению параметра.

3.16. Приведите расчетные зависимости для оценки надежности элементов привода машин по заданным критериям.

Глава 4

4.1. Что понимается под сложной технической системой?

4.2. Опишите структурные модели надежности сложных технических систем.

4.3. В чем заключается расчет надежности технической системы? Что является основой составления структурной схемы надежности машин?

4.4. Рассмотрите пример оценки вероятности и среднего времени безотказной работы технической системы с последовательным соединением элементов в структурной схеме.

4.5. Как определяется надежность технической системы из параллельно соединенных элементов в структурной схеме?

4.6. Каково назначение и разновидности резервирования для повышения надежности сложных технических систем? Дайте краткую их характеристику.

4.7. Поясните сущность резервирования с нагруженным и ненагруженным резервом.

4.8. Приведите структурные схемы общего и отдельного резервирования сложной технической системы.

4.9. Изложите порядок определения вероятности безотказной работы для технической системы, элементы которой соединены комбинированно (с сочетанием последовательного и параллельного соединения) в плане их влияния на надежность всей системы в целом.

4.10. Какими методами резервирования обеспечивается повышение надежности подверженных старению технических систем в процессе их эксплуатации?

4.11. Изобразите структурную схему надежности машины и приведите пример расчета вероятности ее безотказной работы.

4.12. Сущность анализа надежности сложных технических систем с помощью дерева отказов.

Глава 5

5.1. Приведите классификацию факторов, влияющих на надежность машин. Каковы основные пути повышения надежности машин?

5.2. Назовите конструктивные мероприятия по повышению надежности машин. Что понимают под агрегатированием конструкции машины?

5.3. Каковы причины снижения уровня надежности машин при производстве?

5.4. Укажите цель технологических методов повышения надежности. Назовите основные группы технологических мероприятий по обеспечению надежности машин в процессе их производства.

5.5. Перечислите основные направления совершенствования системы технической эксплуатации машин, повышающие их надежность.

5.6. Назовите основные группы технологических мероприятий по обеспечению надежности машин в процессе их эксплуатации.

5.7. Назовите основные направления повышения надежности отремонтированных машин.

5.8. Дайте определение понятия «нормы надежности». Возможность решения каких задач обеспечивается при нормировании показателей надежности?

5.9. Порядок выбора номенклатуры показателей и определения норм надежности машин и оборудования. Что понимают под максимальной эффективностью машин?

5.10. По какому критерию оптимизируют показатели надежности? Как практически это делают?

5.11. Назовите критерий оценки экономической эффективности мероприятий по повышению надежности машин.

5.12. Изложите порядок определения годового экономического эффекта от проведения мероприятий по повышению надежности машин.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1 – Критерии предельного состояния составных частей сельскохозяйственных машин

Наименование агрегата или узла	Критерии предельного состояния
Рамные конструкции	<p>1. Усталостные поперечные трещины по основным сечениям длиной по периметру: более 10 % – для поворотной рамы и металлоконструкций; более 20 % – для опорных рам; более 40 % – для несущих систем тракторов (шасси) рамных конструкций машин.</p> <p>2. Изгиб, скручивание и другие повреждения, превышающие допустимые пределы, для устранения которых необходимо полностью демонтировать рамную конструкцию и иметь специальные стационарные ремонтные средства</p>
Двигатель в сборе	<p>1. Предельное состояние блока цилиндров, когда требуется его замена или ремонт с демонтажом и полной разборкой.</p> <p>2. Предельное состояние коленчатого вала, определяемое предельным износом или механическими повреждениями, требующими его замены или шлифовки.</p> <p>3. Предельный расход масла на угар или предельная величина прорыва газов в картер, не устраняемые заменой комплекта поршневых колец</p>
Коробки передач, главные передачи, ведущие мосты, бортовые и другие редукторы	<p>1. Предельное состояние корпуса (трещины или износ посадочных мест, при которых требуется замена корпуса или его ремонт с демонтажом и полной разборкой).</p> <p>2. Предельное состояние более 25 % валов и шестерен (но не менее двух валов и/или шестерен).</p> <p>3. Предельное состояние эпициклической шестерни (для планетарного редуктора)</p>
Механическая коробка передач	<p>1. Предельное состояние картера.</p> <p>2. Предельное состояние более двух шестерен постоянного зацепления при наработке более 2000 ч.</p> <p>3. Предельное состояние хотя бы одного вала, определяемое предельным износом шлицев, наличием трещин, предельным изгибом.</p> <p>4. Предельное состояние хотя бы одной шестерни, расположенной на вторичном валу.</p> <p>5. Предельное состояние или разрушение подшипника вторичного вала</p>

Продолжение таблицы 1

Зубчатые передачи	1. Предельный износ или износ зубьев. 2. Выкрашивание рабочей поверхности зуба общей площадью более 25 %
Муфта сцепления	1. Износ шлицев или посадочных мест под подшипники на валу или излом вала, при котором требуется его замена. 2. Износ или разрушение нажимного (ведущего) диска
Бортовой фрикцион	Трещины или износ внутреннего или внешнего барабанов, требующие их замены или ремонта с демонтажом и полной разборкой
Карданная передача	1. Трещины в трубах, вилках, по сварным швам. 2. Предельный износ шлицевых соединений. 3. Предельный износ отверстий под стаканы игольчатых подшипников
Управление поворотом с гидросистемой или гидроусилителем	Предельное состояние не менее двух составных частей: рулевого механизма, гидронасоса, распределителя, гидроцилиндра
Цепные передачи, цепные рабочие органы, гусеничные звенья	1. Предельное увеличение шага цепи. 2. Предельное состояние (износ, разрушение и т.п.) более 20 % звеньев
Натяжные колеса	Предельный износ обода или посадочных мест под подшипники, или сколы бортов обода по длине более 1/4 окружности
Катки опорные, поддерживающие	1. Предельный износ реборд, беговых дорожек роликов. 2. Скол реборд роликов по длине более 1/4 окружности
Гидроцилиндры	1. Изгиб штока (не устранимая путем замены манжет утечка рабочей жидкости по штоку более пяти капель в минуту). 2. Наличие любой трещины в стакане (гильзе)

Таблица 2 – Значения функции нормального распределения

(интеграл вероятностей) $\Phi^*(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$; $x = (t - M_t) / \sigma$; $t = U_p = U_\gamma = U_\alpha$

t	Φ^*	Δ	t	Φ^*	Δ	t	Φ^*	Δ
0	0,5000	40	-0,44	0,3300	36	-0,88	0,1894	27
-0,01	4960	40	-0,45	3264	36	-0,89	1867	26
-0,02	4920	40	-0,46	3228	36	-0,90	1841	27
-0,03	4880	40	-0,47	3192	36	-0,91	1814	26
-0,04	4840	39	-0,48	3156	36	-0,92	1788	26

Продолжение таблицы 2

-0,05	4801	40	-0,49	3121	36	-0,93	1762	26
-0,06	4761	40	-0,50	3085	35	-0,94	1736	25
-0,07	4721	40	-0,51	3050	35	-0,95	1711	26
-0,08	4681	40	-0,52	3015	34	-0,96	1685	25
-0,09	4641	39	-0,53	2981	35	-0,97	1660	25
-0,10	0,4602	40	-0,54	0,2946	34	-0,98	0,1635	24
-0,11	4562	40	-0,55	2912	35	-0,99	1611	24
-0,12	4522	39	-0,56	2877	34	-1,00	1587	24
-0,13	4483	40	-0,57	2843	33	-1,01	1563	24
-0,14	4443	39	-0,58	2810	34	-1,02	1539	24
-0,15	4404	40	-0,59	2776	33	-1,03	1515	23
-0,16	4364	39	-0,60	2743	34	-1,04	1492	23
-0,17	4325	39	-0,61	2709	33	-1,05	1469	23
-0,18	4286	39	-0,62	2676	33	-1,06	1446	23
-0,19	4247	40	-0,63	2643	32	-1,07	1423	22
-0,20	0,4207	39	-0,64	0,2611	33	-1,08	0,1401	22
-0,21	4168	39	-0,65	2578	32	-1,09	1379	22
-0,22	4129	39	-0,66	2546	32	-1,10	1357	22
-0,23	4090	38	-0,67	2514	31	-1,11	1335	21
-0,24	4052	39	-0,68	2483	32	-1,12	1314	22
-0,25	4013	39	-0,69	2451	31	-1,13	1292	21
-0,26	3974	38	-0,70	2420	31	-1,14	1271	20
-0,27	3936	39	-0,71	2389	31	-1,15	1251	21
-0,28	3897	38	-0,72	2358	31	-1,16	1230	20
-0,29	3859	38	-0,73	2327	30	-1,17	1210	20
-0,30	0,3821	38	-0,74	0,2297	31	-1,18	0,1190	20
-0,31	3783	38	-0,75	2266	30	-1,19	1170	19
-0,32	3745	38	-0,76	2236	30	-1,20	1151	20
-0,33	3707	38	-0,77	2206	29	-1,21	1131	19
-0,34	3669	37	-0,78	2177	29	-1,22	1112	19
-0,35	3632	38	-0,79	2148	29	-1,23	1093	18
-0,36	3594	37	-0,80	2119	29	-1,24	1075	19
-0,37	3557	37	-0,81	2090	29	-1,25	1056	18
-0,38	3520	37	-0,82	2061	28	-1,26	1038	18
-0,39	3483	37	-0,83	2033	28	-1,27	1020	17
-0,40	0,3446	37	-0,84	0,2005	28	-1,28	0,1003	18
-0,41	3409	37	-0,85	1977	28	-1,29	0985	17
-0,42	3372	36	-0,86	1949	27	-1,30	0968	17
-0,43	3336	36	-0,87	1922	28	-1,31	0951	17
-1,32	0,0934	16	-1,86	0,0314	7	0,20	0,5793	39
-1,33	0918	17	-1,87	0307	6	0,21	5832	39
-1,34	0901	16	-1,88	0301	7	0,22	5871	39

Продолжение таблицы 2

-1,35	0885	16	-1,89	0294	6	0,23	5910	38
-1,36	0869	16	-1,90	0288	7	0,24	5948	39
-1,37	0853	15	-1,91	0281	7	0,25	5987	39
-1,38	0838	15	-1,92	0274	6	0,26	6026	38
-1,39	0823	15	-1,93	0268	6	0,27	6064	39
-1,41	0808	15	-1,94	0262	6	0,28	6103	38
-1,41	0793	15	-1,95	0256	6	0,29	6141	38
-1,42	0,0778	14	-1,96	0,0250	6	0,30	0,6179	38
-1,43	0764	15	-1,97	0244	5	0,31	6217	38
-1,44	0749	14	-1,98	0239	6	0,32	6255	38
-1,45	0735	14	-1,99	0233	5	0,33	6293	38
-1,46	0721	13	-2,00	0228	49	0,34	6331	37
-1,47	0708	14	-2,10	0179	40	0,35	6368	38
-1,48	0694	13	-2,20	0139	32	0,36	6406	37
-1,49	0681	13	-2,30	0107	25	0,37	6443	37
-1,50	0668	13	-2,40	0082	20	0,38	6480	37
-1,51	0655	12	-2,50	0062	15	0,39	6517	37
-1,52	0,0643	13	-2,60	0,0047	12	0,40	0,6554	37
-1,53	0630	12	-2,70	0035	9	0,41	6591	37
-1,54	0618	12	-2,80	0026	7	0,42	6628	36
-1,55	0606	12	-2,90	0019	5	0,43	6664	36
-1,56	0594	12	-3,00	0014	4	0,44	6700	36
-1,57	0582	11	-3,10	0010	3	0,45	6736	36
-1,58	0571	12	-3,20	0007	2	0,46	6772	36
-1,59	0559	11	-3,30	0005	2	0,47	6808	36
-1,60	0548	11	-3,40	0003	1	0,48	6844	35
-1,61	0537	11	-3,50	0002	0	0,49	6879	36
-1,62	0,0526	10	-3,60	0,0002	1	0,50	0,6915	35
-1,63	0516	11	-3,70	0001	0	0,51	6950	35
-1,64	0505	10	-3,80	0001	1	0,52	6985	34
-1,65	0495	10	-3,90	0000	0	0,53	7019	35
-1,66	0485	10	0,00	5000	40	0,54	7054	34
-1,67	0475	10	0,01	5040	40	0,55	7088	35
-1,68	0465	10	0,02	5080	40	0,56	7123	34
-1,69	0455	9	0,03	5120	40	0,57	7157	33
-1,70	0446	10	0,04	5160	39	0,58	7190	34
-1,71	0436	9	0,05	5199	40	0,59	7224	33
-1,72	0,0427	9	0,06	0,5239	40	0,60	0,7257	34
-1,73	0418	9	0,07	5279	40	0,61	7291	33
-1,74	0409	8	0,08	5319	40	0,62	7324	33
-1,75	0401	9	0,09	5359	39	0,63	7357	32
-1,76	0392	8	0,10	5398	40	0,64	7389	33

Продолжение таблицы 2

-1,77	0384	9	0,11	5438	40	0,65	7422	32
-1,78	0375	8	0,12	5478	39	0,66	7454	32
-1,79	0367	8	0,13	5517	40	0,67	7486	31
-1,80	0359	8	0,14	5557	39	0,68	7517	32
-1,81	0351	7	0,15	5596	40	0,69	7549	31
-1,82	0,0344	8	0,16	0,5636	39	0,70	0,7580	31
-1,83	0336	7	0,17	5675	39	0,71	7611	31
-1,84	0329	7	0,18	5714	39	0,72	7642	31
-1,85	0322	8	0,19	5753	40	0,73	7673	30
0,74	0,7703	31	1,23	0,8907	18	1,72	0,9573	13
0,75	7734	30	1,24	8925	19	1,73	9582	12
0,76	7764	30	1,25	8944	18	1,74	9591	12
0,77	7794	29	1,26	8962	18	1,75	9599	12
0,78	7823	29	1,27	8980	17	1,76	9608	12
0,79	7852	29	1,28	8997	18	1,77	9616	11
0,80	7881	29	1,29	9015	17	1,78	9625	12
0,81	7910	29	1,30	9032	17	1,79	9633	11
0,82	7939	28	1,31	9049	17	1,80	9641	11
0,83	7967	28	1,32	9066	16	1,81	9649	11
0,84	0,7995	28	1,33	0,9082	17	1,82	0,9656	10
0,85	8023	28	1,34	9099	16	1,83	9664	11
0,86	8051	27	1,35	9115	16	1,84	9671	10
0,87	8078	28	1,36	9131	16	1,85	9678	10
0,88	8106	27	1,37	9147	15	1,86	9686	10
0,89	8133	26	1,38	9162	15	1,87	9693	10
0,90	8159	27	1,39	9177	15	1,88	9699	10
0,91	8212	26	1,40	9192	15	1,89	9706	9
0,92	8238	26	1,41	9207	15	1,90	9713	6
0,93	8264	25	1,42	9222	14	1,91	9719	7
0,94	0,8289	26	1,43	0,9236	15	1,92	0,9726	6
0,95	8315	25	1,44	9251	14	1,93	9732	6
0,96	8340	25	1,45	9265	14	1,94	9738	6
0,97	8365	24	1,46	9279	13	1,95	9744	6
0,98	8389	24	1,47	9292	14	1,96	9750	6
0,99	8413	24	1,48	9306	13	1,97	9756	5
1,00	8437	24	1,49	9319	13	1,98	9761	6
1,01	8461	24	1,50	9332	17	1,99	9767	5
1,02	8485	23	1,51	9345	17	2,00	9772	49
1,03	8508	23	1,52	9357	16	2,10	9821	40
1,04	0,8531	23	1,53	0,9370	17	2,20	0,9861	32
1,05	8554	23	1,54	9382	16	2,30	9893	25
1,06	8577	22	1,55	9394	16	2,40	9919	20

Продолжение таблицы 2

1,07	8599	22	1,56	9406	16	2,50	9938	15
1,08	8621	22	1,57	9418	15	2,60	9954	12
1,09	8186	26	1,58	9429	15	2,70	9965	9
1,10	8643	22	1,59	9441	15	2,80	9974	7
1,11	8665	21	1,60	9452	15	2,90	9981	5
1,12	8686	22	1,61	9463	15	3,00	9986	4
1,13	8708	21	1,62	9474	14	3,10	9990	3
1,14	0,8729	20	1,63	0,9484	15	3,20	0,9993	2
1,15	8749	21	1,64	9495	14	3,30	9995	2
1,16	8770	20	1,65	9505	14	3,40	9997	1
1,17	8790	20	1,66	9515	13	3,50	9998	0
1,18	8810	20	1,67	9525	14	3,60	9998	1
1,19	8830	19	1,68	9535	13	3,70	9999	0
1,20	8849	20	1,69	9545	13	3,80	9999	1
1,21	8869	19	1,70	9554	13	3,90	1,0000	0
1,22	8888	19	1,71	9564	12			

Примечание: по расчетному значению квантили x находят функцию распределения.
 Так, при $t = -0,40$ $\Phi^* = 0,3446 + 0,0037 = 0,3483$.

Таблица 3 – Дифференциальная функция

(функция плотности вероятности) закона нормального распределения

$$f_0 \left(\frac{t_{ci} - \bar{t}}{\sigma} \right)$$

f_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,1	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,39	0,39	0,39	0,39
0,2	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
0,3	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,37
0,4	0,37	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,35
0,5	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
0,6	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31
0,7	0,31	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29
0,8	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0,9	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24
1,0	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22
1,1	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20
1,2	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17

Продолжение таблицы 3

1,3	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15
1,4	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13
1,5	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11
1,6	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
1,7	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08
1,8	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
1,9	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
2,0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
2,1	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
2,2	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
2,3	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
2,4	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
2,5	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
2,6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
2,8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблица 4 – Интегральная функция (функция распределения) закона нормального распределения

$$F_0 \left(\frac{t_{ki} - \bar{t}}{\sigma} \right)$$

F_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,52	0,53	0,53	0,54
0,1	0,54	0,54	0,55	0,55	0,56	0,56	0,56	0,57	0,57	0,58
0,2	0,58	0,58	0,59	0,59	0,60	0,60	0,60	0,61	0,61	0,61
0,3	0,62	0,62	0,63	0,63	0,63	0,64	0,64	0,64	0,65	0,65
0,4	0,66	0,66	0,66	0,67	0,67	0,67	0,68	0,68	0,68	0,69
0,5	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,71	0,71	0,72	0,72	0,72
0,6	0,73	0,73	0,73	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,75	0,76
0,7	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77	0,77	0,78	0,78	0,78	0,79
0,8	0,79	0,79	0,79	0,80	0,80	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81
0,9	0,82	0,82	0,82	0,82	0,83	0,83	0,83	0,83	0,84	0,84
1,0	0,84	0,84	0,85	0,85	0,85	0,85	0,86	0,86	0,86	0,86
1,1	0,86	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
1,2	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90
1,3	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92	0,92
1,4	0,92	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
1,5	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94

Продолжение таблицы 4

1,6	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
1,7	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
1,8	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
1,9	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
2,0	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
2,1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
2,2	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
2,3	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
2,4	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
2,5	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Таблица 5 – Параметры и коэффициенты распределения Вейбулла

$$a = \frac{\bar{t} - C}{K_B}; \quad a = \frac{\sigma}{C_B}; \quad \bar{t} = a \cdot K_B + C$$

<i>V</i>	<i>b</i>	<i>K_B</i>	<i>C_B</i>	<i>V</i>	<i>b</i>	<i>K_B</i>	<i>C_B</i>	<i>V</i>	<i>b</i>	<i>K_B</i>	<i>C_B</i>
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1,26	0,80	1,13	1,43	0,55	1,90	0,89	0,49	0,36	3,00	0,89	0,33
1,11	0,90	1,07	1,20	0,52	2,00	0,89	0,46	0,35	3,10	0,89	0,32
1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	2,10	0,89	0,44	0,34	3,20	0,90	0,31
0,91	1,10	0,97	0,88	0,48	2,20	0,89	0,43	0,33	3,30	0,90	0,30
0,84	1,20	0,94	0,79	0,46	2,30	0,89	0,41	0,33	3,40	0,90	0,29
0,78	1,30	0,92	0,72	0,44	2,40	0,89	0,39	0,32	3,50	0,90	0,29
0,72	1,40	0,91	0,66	0,43	2,50	0,89	0,38	0,31	3,60	0,90	0,28
0,68	1,50	0,90	0,61	0,41	2,60	0,89	0,37	0,30	3,70	0,90	0,27
0,64	1,60	0,90	0,57	0,40	2,70	0,89	0,35	0,29	3,80	0,90	0,27
0,61	1,70	0,89	0,54	0,39	2,80	0,89	0,34	0,29	3,90	0,91	0,26
0,58	1,80	0,89	0,51	0,38	2,90	0,89	0,34	0,28	4,00	0,91	0,25

Таблица 6 – Дифференциальная функция (функция плотности вероятности)

закона распределения Вейбулла $f\left(\frac{t_{ci} - C}{a}\right)$

$\frac{t_{ci} - C}{a}$	<i>b</i>						
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0
0,1	0,91	0,71	0,54	0,39	0,28	0,20	0,03
0,2	0,82	0,75	0,66	0,57	0,47	0,38	0,12
0,3	0,74	0,75	0,72	0,67	0,61	0,55	0,26
0,4	0,67	0,72	0,74	0,73	0,71	0,68	0,45
0,5	0,61	0,68	0,73	0,76	0,78	0,78	0,66
0,6	0,55	0,63	0,70	0,76	0,80	0,84	0,87
0,7	0,50	0,58	0,66	0,73	0,80	0,86	1,04
0,8	0,45	0,53	0,62	0,70	0,77	0,84	1,15

Продолжение таблицы 6

0,9	0,41	0,49	0,57	0,65	0,72	0,80	1,17
1,0	0,37	0,44	0,52	0,59	0,66	0,74	1,10
1,1	0,33	0,40	0,46	0,53	0,59	0,66	0,96
1,2	0,30	0,36	0,41	0,47	0,52	0,57	0,77
1,3	0,27	0,32	0,37	0,41	0,45	0,48	0,56
1,4	0,25	0,29	0,32	0,35	0,38	0,39	0,38
1,5	0,22	0,26	0,28	0,30	0,31	0,32	0,23
1,6	0,20	0,23	0,25	0,25	0,26	0,25	0,13
1,7	0,18	0,20	0,21	0,21	0,21	0,19	0,06
1,8	0,17	0,18	0,18	0,16	0,16	0,14	0,03
1,9	0,15	0,16	0,16	0,14	0,13	0,10	0,01
2,0	0,14	0,14	0,13	0,12	0,10	0,07	0,00
2,1	0,12	0,12	0,15	0,09	0,07	0,05	0,00
2,2	0,11	0,11	0,09	0,08	0,05	0,04	–
2,3	0,10	0,09	0,08	0,06	0,04	0,02	–
2,4	0,09	0,08	0,07	0,05	0,03	0,02	–
2,5	0,08	0,07	0,06	0,04	0,02	0,01	–

Таблица 7 – Интегральная функция (функция распределения)

закона распределения Вейбулла $F\left(\frac{t_{ki} - C}{a}\right)$

$\frac{t_{ki} - C}{a}$	b										
	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
0,1	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01
0,2	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05
0,3	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10
0,4	0,35	0,33	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,16
0,5	0,41	0,39	0,37	0,35	0,33	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,24
0,6	0,47	0,45	0,43	0,42	0,40	0,39	0,37	0,36	0,34	0,33	0,32
0,7	0,52	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,44	0,43	0,43	0,41	0,40
0,8	0,56	0,55	0,54	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,50	0,49	0,48
0,9	0,60	0,59	0,59	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,53	0,63	0,63	0,63
1,1	0,66	0,67	0,67	0,67	0,68	0,68	0,68	0,69	0,69	0,70	0,70
1,2	0,69	0,70	0,71	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,74	0,75	0,76
1,3	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81
1,4	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
1,5	0,76	0,78	0,79	0,80	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,89
1,6	0,78	0,80	0,81	0,80	0,84	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91
1,7	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,92	0,93	0,94
1,8	0,82	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
1,9	0,83	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97

Продолжение таблицы 7

2,0	0,85	0,87	0,88	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98
2,1	0,86	0,88	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98
2,2	0,87	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99
2,3	0,88	0,90	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99
2,4	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00
2,5	0,90	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00
2,6	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00
2,7	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00
2,8	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00
2,9	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
3,0	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
3,5	0,95	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4,0	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Продолжение таблицы 7

$\frac{t_{ki} - C}{a}$	b									
	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
0,1	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
0,3	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
0,4	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07
0,5	0,22	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13
0,6	0,30	0,29	0,28	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20
0,7	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30
0,8	0,47	0,47	0,46	0,45	0,44	0,44	0,43	0,42	0,41	0,41
0,9	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,53	0,52
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1,1	0,70	0,71	0,71	0,71	0,72	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73
1,2	0,76	0,77	0,78	0,78	0,79	0,79	0,80	0,81	0,81	0,82
1,3	0,82	0,82	0,83	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88
1,4	0,86	0,87	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91	0,92	0,92	0,93
1,5	0,90	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,96	0,96
1,6	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98
1,7	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99
1,8	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00
1,9	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
2,0	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,1	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,2	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Продолжение таблицы 7

$\frac{t_{ki} - C}{a}$	b										
	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,3	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
0,4	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
0,5	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06
0,6	0,19	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12
0,7	0,29	0,28	0,27	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21
0,8	0,40	0,39	0,39	0,38	0,37	0,37	0,36	0,35	0,35	0,34	0,34
0,9	0,52	0,51	0,51	0,51	0,50	0,50	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1,1	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77
1,2	0,82	0,83	0,83	0,84	0,84	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87
1,3	0,89	0,90	0,90	0,91	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94
1,4	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98
1,5	0,97	0,97	0,99	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
1,6	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,7	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Таблица 8 – Значения вероятностей $P(n)$ закона распределения Пуассона

n	Значение $P(n)$ при a									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,3679	0,1353	0,0408	0,0183	0,0067	0,0025	0,0009	0,0003	0,0001	0,0000
1	0,3679	0,2707	0,1494	0,0733	0,0337	0,0149	0,0064	0,0027	0,0011	0,0005
2	0,1839	0,2707	0,2240	0,1465	0,0842	0,0446	0,0223	0,0107	0,0050	0,0023
3	0,0613	0,1804	0,2240	0,1954	0,1404	0,0892	0,0521	0,0286	0,0150	0,0076
4	0,0153	0,0902	0,1680	0,1954	0,1755	0,1339	0,0912	0,0572	0,0337	0,0189
5	0,0031	0,0361	0,1008	0,1563	0,1755	0,1606	0,1277	0,0916	0,0607	0,0378
6	0,0005	0,0120	0,0504	0,1042	0,1462	0,1606	0,1490	0,1221	0,0911	0,0631
7	0,0001	0,0037	0,0216	0,0595	0,1044	0,1377	0,1490	0,1396	0,1171	0,0901
8		0,0009	0,0081	0,0298	0,0653	0,1033	0,1304	0,1396	0,1318	0,1126
9		0,0002	0,0027	0,0132	0,0363	0,0088	0,1014	0,1241	0,1318	0,1251
10			0,0008	0,0053	0,0181	0,0413	0,0710	0,0993	0,1186	0,1251
11			0,0002	0,0019	0,0082	0,0225	0,0452	0,0722	0,0970	0,1137
12			0,0001	0,0006	0,0034	0,0126	0,0263	0,0481	0,0728	0,0948
13				0,0002	0,0013	0,0052	0,0142	0,0296	0,0504	0,0729
14				0,0001	0,0005	0,0022	0,0071	0,0169	0,0324	0,0521
15					0,0002	0,0009	0,0033	0,0090	0,0194	0,0347

Продолжение таблицы 8

16						0,0003	0,0014	0,0045	0,0109	0,0217
17						0,0001	0,0006	0,0021	0,0058	0,0128
18							0,0002	0,0009	0,0029	0,0071
19							0,0001	0,0004	0,0014	0,0037
20								0,0002	0,0006	0,0019
21								0,0001	0,0003	0,0009
22									0,0001	0,0004
23										0,0002
24										0,0001

Таблица 9 – Таблица значений $P(\lambda_k)$ критерия согласия Колмогорова

λ_k	$P(\lambda_k)$	λ_k	$P(\lambda_k)$
0,00	1,000	0,70	0,711
0,10	1,000	0,75	0,627
0,20	1,000	0,80	0,544
0,30	1,000	0,85	0,465
0,35	0,999	0,90	0,393
0,40	0,997	0,95	0,328
0,45	0,987	1,00	0,270
0,50	0,964	1,10	0,178
0,55	0,923	1,20	0,112
0,60	0,864	1,30	0,068
0,65	0,795	1,40	0,039

Таблица 10 – Критические значения $\chi^2_\alpha(r)$ критерия К. Пирсона

Число степеней свободы	Значение $\chi^2_\alpha(r)$ при α						
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,95	0,99
1	0,016	0,148	0,455	1,07	2,71	3,84	6,63
2	0,211	0,713	1,39	2,41	4,61	5,99	9,21
3	0,594	1,42	2,37	3,67	6,25	7,81	11,3
4	1,06	2,19	3,36	4,88	7,78	9,49	13,3
5	1,61	3,00	4,35	6,06	9,24	11,1	15,1
6	2,20	3,83	5,35	7,23	10,6	12,6	16,8
7	2,83	4,67	5,35	8,38	12,0	14,1	18,5
8	3,49	5,53	7,34	9,52	13,4	15,5	20,1
9	4,17	6,39	8,34	10,7	14,7	16,9	21,7
10	4,87	7,27	9,34	11,8	16,0	18,3	23,2
11	5,58	8,15	10,3	12,9	17,3	19,7	24,7
12	6,30	9,03	11,3	14,0	18,5	21,0	26,2
13	7,04	9,43	12,3	15,1	19,8	22,4	27,7
14	7,79	10,08	13,3	16,2	21,1	23,7	29,1

Продолжение таблицы 10

15	8,55	11,7	14,3	17,3	22,3	25,0	30,6
16	9,31	12,6	15,3	18,4	23,5	26,3	32,0
17	10,10	13,5	16,3	19,5	24,	27,6	33,4
18	10,9	14,4	17,3	20,6	26,0	28,9	34,8
19	11,7	15,4	18,3	21,7	27,2	30,1	36,2
20	12,4	16,3	19,3	22,8	28,4	31,4	37,6
21	13,2	17,2	20,3	23,9	29,6	32,7	38,9
22	14,0	18,1	21,3	24,9	30,8	33,9	40,3
23	14,8	19,0	22,3	26,0	32,0	35,2	41,7
24	15,7	19,9	23,3	27,1	33,2	36,4	43,0
25	16,5	20,9	24,3	28,2	34,4	37,7	44,3
26	17,3	21,8	25,3	29,2	35,6	38,9	45,6
27	18,1	22,7	26,3	30,3	36,7	40,1	47,0
28	18,9	23,6	27,3	31,4	37,9	41,3	48,3
29	19,8	24,6	28,3	32,5	39,1	42,6	49,6
30	20,6	25,5	29,3	33,5	40,3	43,8	50,9

Таблица 11 – Коэффициент Ирвина λ_T

Повторность информации N	2	3	10	20	30	50	100	400
λ_T при $\beta = 0,95^*$	2,8	2,2	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9
λ_T при $\beta = 0,99$	3,7	2,9	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5	1,3

* β – доверительная вероятность

**Таблица 12 – Коэффициенты τ_β , r_1 и r_3
для двусторонних доверительных границ**

N	$\beta = 0,80$			$\beta = 0,90$			$\beta = 0,95$		
	τ_β	r_1	r_3	τ_β	r_1	r_3	τ_β	r_1	r_3
3	1,89	2,73	0,57	2,92	3,66	0,48	4,30	4,85	0,42
4	1,64	2,29	0,60	2,35	2,93	0,52	3,18	3,67	0,46
5	1,53	2,05	0,62	2,13	2,54	0,55	2,78	3,07	0,49
6	1,48	1,90	0,65	2,02	2,29	0,57	2,78	2,72	0,51
7	1,44	1,80	0,67	1,94	2,13	0,59	2,45	2,48	0,54
8	1,42	1,72	0,68	1,90	2,01	0,61	2,37	2,32	0,56
9	1,40	1,66	0,69	1,86	1,91	0,63	2,31	2,18	0,57
10	1,38	1,61	0,70	1,83	1,83	0,64	2,26	2,09	0,59
11	1,37	1,57	0,70	1,81	1,78	0,64	2,23	2,00	0,60
12	1,36	1,53	0,71	1,80	1,73	0,65	2,20	1,94	0,61
13	1,36	1,50	0,73	1,78	1,69	0,66	2,18	1,88	0,62
14	1,35	1,48	0,74	1,77	1,65	0,67	2,16	1,83	0,63
15	1,35	1,46	0,74	1,76	1,62	0,68	2,15	1,79	0,64
20	1,33	1,37	0,77	1,73	1,51	0,72	2,09	1,64	0,67
25	1,32	1,33	0,79	1,71	1,44	0,74	2,06	1,55	0,70

Продолжение таблицы 12

30	1,31	1,29	0,80	1,70	1,39	0,76	2,04	1,48	0,72
40	1,30	1,24	0,83	1,68	1,32	0,78	2,02	1,40	0,75
50	1,30	1,21	0,84	1,68	1,28	0,80	2,01	1,35	0,77
60	1,30	1,19	0,86	1,67	1,25	0,82	2,00	1,31	0,79
80	1,29	1,16	0,87	1,66	1,21	0,84	1,99	1,27	0,81
100	1,29	1,14	0,88	1,66	1,19	0,86	1,98	1,23	0,83

Таблица 13 – Вероятность совпадения P % по критерию согласия χ^2

№	$P, \%$							
	95	90	80	70	50	30	20	10
1	0,00	0,02	0,05	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	1,61	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	10,6
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,34	8,38	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

Таблица 14 – Квантили закона распределения Вейбулла H_{κ}^B

$F(t); \Sigma P_i$	b							
	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
0,03	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11
0,05	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
0,07	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19
0,10	0,08	0,11	0,13	0,15	0,18	0,20	0,22	0,25
0,15	0,14	0,17	0,19	0,23	0,25	0,29	0,30	0,33
0,20	0,19	0,22	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,39
0,25	0,25	0,29	0,33	0,36	0,39	0,41	0,44	0,46
0,30	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,50	0,53
0,35	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57	0,59
0,40	0,47	0,51	0,54	0,57	0,60	0,62	0,64	0,66
0,45	0,57	0,60	0,63	0,66	0,68	0,69	0,71	0,73
0,50	0,67	0,69	0,72	0,74	0,75	0,77	0,78	0,80
0,55	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87
0,60	0,91	0,92	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95

Продолжение таблицы 14

0,65	1,07	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03
0,70	1,23	1,20	1,18	1,17	1,15	1,14	1,13	1,12
0,75	1,45	1,40	1,36	1,33	1,33	1,27	1,25	1,23
0,80	1,70	1,61	1,54	1,49	1,44	1,41	1,37	1,35
0,85	2,11	1,96	1,84	1,74	1,67	1,61	1,55	1,51
0,90	2,53	2,30	2,13	2,00	1,90	1,81	1,74	1,68
0,93	2,96	2,66	2,43	2,26	2,12	2,01	1,92	1,84
0,95	3,38	3,00	2,71	2,49	2,33	2,19	2,08	1,99
0,97	4,03	3,51	3,13	2,84	2,63	2,45	2,31	2,19
0,99	5,46	4,60	4,01	3,57	3,24	2,98	2,77	2,60

Продолжение таблицы 14

$F(t); \Sigma P_i$	b							
	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
0,01	0,07	0,08	0,09	0,10	0,16	0,22	0,27	0,31
0,03	0,13	0,14	0,16	0,18	0,25	0,31	0,37	0,42
0,05	0,17	0,19	0,21	0,23	0,31	0,37	0,44	0,48
0,07	0,21	0,23	0,25	0,27	0,35	0,42	0,47	0,52
0,10	0,27	0,29	0,31	0,33	0,41	0,47	0,53	0,57
0,15	0,35	0,38	0,40	0,42	0,50	0,56	0,60	0,63
0,20	0,41	0,44	0,45	0,47	0,55	0,61	0,65	0,69
0,25	0,48	0,50	0,52	0,54	0,61	0,66	0,70	0,73
0,30	0,55	0,56	0,58	0,60	0,66	0,71	0,75	0,77
0,35	0,61	0,62	0,64	0,66	0,71	0,75	0,79	0,81
0,40	0,67	0,69	0,70	0,72	0,76	0,80	0,83	0,85
0,45	0,74	0,75	0,76	0,76	0,81	0,84	0,86	0,88
0,50	0,81	0,82	0,83	0,83	0,86	0,89	0,90	0,91
0,55	0,88	0,89	0,90	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95
0,60	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98
0,65	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02
0,70	1,12	1,11	1,10	1,10	1,08	1,06	1,05	1,05
0,75	1,22	1,21	1,20	1,18	1,14	1,11	1,10	1,09
0,80	1,32	1,30	1,29	1,27	1,21	1,17	1,15	1,13
0,85	1,47	1,45	1,32	1,39	1,31	1,25	1,21	1,18
0,90	1,63	1,59	1,55	1,52	1,40	1,32	1,27	1,23
0,93	1,78	1,72	1,67	1,63	1,48	1,39	1,32	1,28
0,95	1,91	1,84	1,78	1,73	1,55	1,44	1,37	1,32
0,97	2,09	2,01	1,94	1,87	1,65	1,52	1,43	1,37
0,99	2,46	2,34	2,23	2,15	1,84	1,66	1,55	1,46

Таблица 15 – Квантили закона нормального распределения N_k

$F(t); \Sigma P_i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,1	1,282	1,227	1,175	1,126	1,080	1,036	0,994	0,954	0,915	0,878
0,2	0,842	0,806	0,772	0,739	0,706	0,675	0,643	0,613	0,583	0,553
0,3	0,524	0,496	0,468	0,440	0,412	0,385	0,358	0,332	0,305	0,279
0,4	0,253	0,227	0,202	0,176	0,151	0,126	0,100	0,075	0,050	0,025
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

Таблица 16 – Ордината « Y » в мм при ЗНР

$\Sigma P_{\text{они}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0			13,6	22,3	28,8	34,0	38,5	42,5	46,0	49,3
0,1	52,2	55,0	57,5	60,0	62,3	64,5	66,6	68,6	70,5	72,4
0,2	74,2	76,0	77,7	79,3	81,0	82,5	84,1	85,6	87,1	88,6
0,3	90,1	91,5	92,9	94,3	95,7	97,0	98,4	99,7	101,0	102,3
0,4	103,6	104,9	106,2	107,5	108,7	110,0	110,3	112,5	113,8	115,0
0,5	116,5	117,6	118,8	120,1	121,3	122,6	123,9	125,1	126,4	127,7
0,6	129,0	130,3	131,6	132,9	134,2	135,6	136,9	138,3	139,7	141,1
0,7	142,5	144,0	145,5	147,0	148,5	150,1	151,6	153,3	154,9	156,6
0,8	158,4	160,2	162,1	164,0	166,0	168,1	170,3	172,6	175,1	177,6
0,9	180,4	183,3	186,6	190,1	194,1	198,6	203,8	210,3	219,0	-

Таблица 17 – Ордината « Y » в мм при ЗРВ

$\Sigma P_{\text{они}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0		0,5	15,7	24,6	30,9	35,9	40,0	43,4	46,4	49,1
0,1	51,5	53,7	55,7	57,6	59,3	60,9	62,5	63,9	65,3	66,6
0,2	67,8	69,0	70,2	71,3	72,3	73,3	74,3	75,3	76,2	77,1
0,3	78,0	78,9	79,7	80,5	81,3	82,1	82,9	83,6	84,4	85,1
0,4	85,8	86,5	87,2	87,9	88,6	89,2	89,9	90,5	91,2	91,8
0,5	92,4	93,1	93,7	94,3	94,9	95,5	96,1	96,7	97,3	97,9
0,6	98,5	99,1	99,7	100,3	100,8	101,4	102,0	102,6	103,2	103,8
0,7	104,4	105,0	105,6	106,2	106,9	107,5	108,1	108,7	109,4	110,1
0,8	110,7	111,4	112,1	112,8	113,5	114,3	115,1	115,9	116,7	117,6
0,9	118,5	119,5	120,5	121,6	122,9	124,2	125,8	127,6	130,0	133,6

Таблица 18 – Количество машин или их элементов (повторность информации) N при односторонней доверительной вероятности β_0

N	ЗНР δ/v			ЗРВ $(\delta + 1)^b$		
	$\beta_0 = 0,80$	$\beta_0 = 0,90$	$\beta_0 = 0,95$	$\beta_0 = 0,80$	$\beta_0 = 0,90$	$\beta_0 = 0,95$
4	0,49	0,82	1,17	1,74	2,29	2,93
6	0,38	0,60	0,82	1,54	1,90	2,29
8	0,32	0,50	0,67	1,43	1,72	2,01
10	0,28	0,44	0,58	1,37	1,61	1,82
12	0,26	0,39	0,52	1,33	1,53	1,73
14	0,23	0,36	0,47	1,29	1,48	1,65
16	0,22	0,33	0,44	1,27	1,43	1,59
18	0,20	0,31	0,41	1,25	1,40	1,55
20	0,19	0,30	0,39	1,23	1,37	1,51
22	0,18	0,28	0,37	1,22	1,35	1,48
24	0,17	0,27	0,35	1,21	1,33	1,45
26	0,17	0,26	0,33	1,20	1,32	1,43
28	0,16	0,25	0,32	1,19	1,32	1,41
30	0,16	0,24	0,31	1,18	1,29	1,40
40	0,13	0,20	0,26	1,16	1,24	1,32
50	0,12	0,18	0,24	1,14	1,21	1,28
60	0,11	0,16	0,22	1,12	1,19	1,25
70	0,10	0,15	0,20	1,11	1,17	1,23
80	0,10	0,14	0,19	1,10	1,15	1,21
90	0,10	0,14	0,18	1,10	1,15	1,20
100	0,09	0,13	0,17	1,09	1,14	1,19

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.002. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1990. 12 с.
2. ГОСТ 27.003. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М. : Изд-во стандартов, 1991. 27 с.
3. Качество и надежность отечественной техники – основа ее конкурентоспособности / Л. И. Кушнарев, Е. Л. Чепурина, С. Л. Кушнарев, А. В. Чепурин // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 11. С. 35–37. EDN: VBFLZV.
4. Модернизация системы технического сервиса аграрно-промышленного комплекса: Монография / Л. И. Кушнарев, Е. Л. Чепурина, С. Л. Кушнарев, А. В. Чепурин, В. М. Корнеев. М. : МЭСХ, 2015. 440 с. EDN: YNSQCB.
5. Надежность технических систем: Учебник для вузов / О. Н. Дидманидзе, А. В. Чепурин, А. М. Карев, С. Л. Кушнарев. М. : ООО «УМЦ «Триада», 2016. 232 с.
6. Надежность технических систем: Учебник для вузов / А. В. Чепурин, В. М. Корнеев, С. Л. Кушнарев, Е. Л. Чепурина, И. Н. Кравченко, А. М. Орлов. М. : Изд-во РГАУ–МСХА, 2017. 293 с. EDN: YSAGUT.
7. Организация технического сервиса машинно-тракторного парка на предприятиях агропромышленного комплекса. Серия: Инженерно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса: Учебник для вузов / Л. И. Кушнарев, Е. Л. Чепурина, А. В. Чепурин, С. Л. Кушнарев / Под ред. Л. И. Кушнарева. М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2015. 248 с. EDN: VNKPPP.
8. Организация эффективного использования машинно-тракторного парка. Серия: Инженерно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса: Учебник для вузов / Л. И. Кушнарев, Е. Л. Чепурина, А. В. Чепурин, С. Л. Кушнарев / Под ред. Л. И. Кушнарева. М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2015. 272 с. EDN: VNKTKB.
9. Основы инженерно-технического обеспечения агропредприятий. Серия: Инженерно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса: Учебник для вузов / Л. И. Кушнарев, Е. Л. Чепурина, А. В. Чепурин, С. Л. Кушнарев / Под ред. Л. И. Кушнарева. М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2015. 224 с. EDN: VNKQRR.
10. Основы теории надежности: Учебник для вузов / А. В. Чепурин, О. П. Андреев, Е. Л. Чепурина, Д. А. Рыбалкин, Д. Л. Кушнарева. М. : Типография ПМГ, 2023. 232 с.

11. Оценка надежности машин и оборудования: теория и практика: учебник / И. Н. Кравченко, Е. А. Пучин, А. В. Чепурин [и др.]; под ред. проф. И. Н. Кравченко. М. : ИНФРА-М, 2012. 336 с.

12. Оценка надежности машин и обоснование мероприятий по ее повышению в процессе эксплуатации: Учебное пособие / И. Н. Кравченко, А. В. Чепурин, А. М. Карев, В. Ю. Гладков, С. Л. Кушнарев, С. А. Сычев. М. : Изд-во «УМЦ «Триада», 2012. 105 с.

13. Оценка точности измерений под шкив коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238 / Ю. Г. Вергазова, А. В. Чепурин, Э. И. Черкасова, У. Ю. Антонова // Сельский механизатор. 2022. № 12. С. 38–40. EDN: QRUDYB.

14. **Парлюк Е. П., Кушнарева Д. Л.** Совершенствование организации технического сервиса машин и оборудования // Сельский механизатор. 2023. № 3. С. 38–40. EDN: HNSWGG.

15. **Чепурина Е. Л., Кушнарев С. Л., Чепурин А. В.** Проблемы технологической модернизации системы технического сервиса машин и оборудования АПК. Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции 15–17 октября 2015 года. Мичуринск : Издательство «2Д Мичуринск». С. 297–305. EDN: ZGTJPF.

16. **Чепурина Е. Л., Чепурин А. В., Кушнарева Д. Л.** Оценка технического сервиса машин и оборудования животноводства с участием фирм-производителей // Сельский механизатор. 2023. № 12. С. 33–35. EDN: LGUDHO.

17. **Чепурина Е. Л., Чепурин А. В., Кушнарева Д. Л.** Технический сервис машин и оборудования животноводства: состояние и перспективы его организации // Агроинженерия. 2024. № 26 (6). С. 49–55. EDN: FQBTUB.

18. **Чепурин А. В.** Курсовое проектирование по надежности технических систем: Учебное пособие по курсовому проектированию. М. : Изд-во РГАУ–МСХА, 2021. 78 с. EDN: HNDZLO.

19. **Чепурин А. В., Чепурина Е. Л., Кушнарева Д. Л.** Организация фирменного сервиса отечественной сельскохозяйственной техники // Сельский механизатор. 2023. № 4. С. 40–43. EDN: МОКТДВ.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1. Основные характеристики надежности машин ...	6
1.1. Общие принципы обеспечения надежности машин.....	6
1.1.1. Стандартизация в области надежности.....	8
1.1.2. Связь диагностики с надежностью.....	14
1.2. Основные понятия и определения теории надежности....	16
1.3. Показатели надежности машин.....	37
1.3.1. Единичные показатели надежности.....	40
1.3.2. Комплексные показатели надежности.....	55
Глава 2. Физические основы теории надежности машин ...	60
2.1. Общие сведения об изнашивании.....	60
2.2. Виды и характеристики изнашивания.....	67
2.2.1. Механическое изнашивание.....	67
2.2.2. Коррозионно-механическое изнашивание.....	69
2.2.3. Электроэрозионное изнашивание.....	70
2.2.4. Другие виды изнашивания.....	71
Глава 3. Методы расчета показателей надежности машин	73
3.1. Сбор информации о показателях надежности машин.....	75
3.2. Методика обработки полной информации.....	79
3.3. Методика определения количества деталей, годных для дальнейшего использования и требующих восстановления.....	100
3.4. Графические методы обработки информации по показателям надежности.....	119
3.5. Методика обработки многократно усеченной информации...	127
3.6. Определение остаточного ресурса элемента при прогнозировании по реализации изменения параметра...	131
3.7. Расчетные зависимости надежности узлов и деталей машин по заданным критериям.....	148
Глава 4. Основы надежности сложных технических систем ...	157
4.1. Общие сведения о сложных технических системах.....	157
4.2. Структурные модели надежности элементов сложных технических систем.....	158
4.3. Резервирование и его разновидности для повышения надежности сложных технических систем...	162
4.4. Анализ надежности сложных технических систем с помощью дерева отказов.....	174

Глава 5. Основные направления	
повышения надежности машин.....	177
5.1. Характеристика методов повышения надежности машин.....	177
5.2. Конструктивные методы повышения надежности машин.....	178
5.3. Технологические методы повышения надежности машин.....	181
5.4. Обеспечение надежности машин при эксплуатации.....	184
5.5. Повышение надежности машин при ремонте.....	187
5.6. Экономическая эффективность мероприятий по повышению надежности машин.....	189
Контрольные вопросы и задания	
для самостоятельного изучения.....	194
Приложения.....	200
Список литературы.....	217

Учебное издание

Чепурин Александр Васильевич
Чепурина Екатерина Леонидовна
Кушнарёва Дарья Леонидовна
Пупкова Дарья Александровна
Гринченко Лаврентий Александрович

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебник

Издается в авторской редакции
Оригинал-макет *Светлана Должикова*
Дизайн обложки *Андрей Иванов*

Подписано в печать 23.01.2026. Формат 60x90/16
Усл.-печ. л. 13,56. Тираж 500 экз. Заказ № 18

ООО «УМЦ «Триада»
Тел.: 8 (495) 643-28-71
127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 23А

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»
Тел.: +7 (499) 322-38-31
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5