

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Вагоны»

В. В. ПИГУНОВ

НАДЕЖНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности «Подвижной состав
железнодорожного транспорта»*

Гомель 2016

УДК 624.04:629.4
ББК 38.112
ПЗ2

Р е ц е н з е н т ы: заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» Государственного экономико-технологического университета (г. Киев, Украина) д-р техн. наук, профессор *М.Б. Кельрих*;
заведующий кафедрой «Тракторы» УО «Белорусский национальный технический университет» д-р техн. наук, профессор *В.П. Бойков*.

Пигунов, В. В.

ПЗ2 Надежность подвижного состава железнодорожного транспорта: учеб. пособие / В. В. Пигунов; М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2016. – 202 с.
ISBN 978-985-554-571-3

Рассмотрены основные понятия и специфика задач обеспечения надежности вагонов, а также методы оценки количественных характеристик надежности при проектировании и по результатам эксплуатации.

Предназначено для студентов всех форм обучения специальности «Подвижной состав железнодорожного транспорта» и может быть использовано инженерно-техническими работниками в их практической деятельности.

УДК 624.04:629.4
ББК 38.112

ISBN 978-985-554-571-3

© Пигунов В. В., 2016
© Оформление. УО «БелГУТ», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|------------|
| Введение | 5 |
| 1 Основные понятия и положения теории надежности | 8 |
| 1.1 Особенность проблемы надежности | 8 |
| 1.2 Основные понятия, термины и определения | 11 |
| 1.3 Отказы вагонов и их элементов | 26 |
| 1.4 Случайные величины и их характеристики | 38 |
| 2 Основные показатели надежности | 45 |
| 2.1 Показатели безотказности | 45 |
| 2.2 Показатели долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости | 67 |
| 2.2.1 Показатели долговечности | 67 |
| 2.2.2 Показатели ремонтпригодности и сохраняемости | 69 |
| 2.3 Показатели готовности | 71 |
| 2.4 Экономические показатели надежности | 73 |
| 3 Основные законы распределения, используемые в теории надежности | 77 |
| 3.1 Экспоненциальное распределение | 77 |
| 3.2 Нормальное распределение | 82 |
| 3.3 Усеченное нормальное распределение | 94 |
| 3.4 Логарифмически нормальное распределение | 96 |
| 3.5 Распределение Вейбулла | 97 |
| 3.6 Гамма-распределение | 100 |
| 4 Расчет показателей надежности при проектировании | 104 |
| 4.1 Общие сведения по расчету структурной надежности объекта | 104 |
| 4.2 Влияние схемы соединения элементов на надежность объектов | 106 |
| 4.3 Расчет структурной надежности вагона | 110 |
| 4.4 Резервирование как способ повышения надежности объектов | 114 |
| 5 Оценка показателей надежности по результатам эксплуатации | 120 |
| 5.1 Требования, предъявляемые к организации испытаний | 120 |
| 5.2 Выбор плана испытаний на надежность | 122 |
| 5.3 Планирование испытаний (определение требуемого объема испытаний) | 125 |
| 5.4 Требования, предъявляемые к сбору и предварительной обработке информации | 129 |
| 5.5 Особенности статистической обработки информации | 133 |
| 5.6 Оценка показателей надежности (статистическая обработка информации) | 139 |
| 5.6.1 Общие требования. Методы оценки показателей надежности | 139 |
| 5.6.2 Доверительные границы рассеивания точечных значений показателей надежности при известном законе распределения | 140 |
| 5.6.3 Определение точечных оценок параметров распределений при известном законе распределения | 143 |
| 5.6.4 Определение точечных оценок параметров распределений при неизвестном законе распределения | 154 |
| 5.6.5 Оценка показателей надежности при известном законе распределения | 161 |
| 5.6.6 Оценка показателей надежности при неизвестном законе распределения | 164 |

| | |
|---|-----|
| 6 Основные направления обеспечения надежности вагонов | 169 |
| 6.1 Обеспечение надежности вагонов на этапах проектирования и изготовления | 169 |
| 6.2 Особенности поддержания надежности вагонов на этапе эксплуатации | 171 |
| Приложение А. Значения интегральной функции $F_0(x)$ | 183 |
| Приложение Б. Значения интегральной $\Phi(x)$ и дифференциальной $\phi(x)$ функций | 184 |
| нормированного нормального распределения | 184 |
| Приложение В. Квантили нормированного нормального распределения. | 188 |
| Коэффициенты Ирвина λ_r | 188 |
| Приложение Г. Значения функции e^{-x} | 189 |
| Приложение Д. Значения гамма-функции $\Gamma(x)$ | 191 |
| Приложение Е. Точечная оценка параметров экспоненциального распределения | 192 |
| Приложение Ж. Точечная оценка параметров распределения Вейбулла | 193 |
| Приложение И. Точечная оценка параметров нормального распределения | 195 |
| Приложение К. Интервальные оценки показателей надежности | 198 |
| для основных распределений | 198 |
| Список литературы | 200 |

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем железнодорожного транспорта является необходимость обеспечения надежной работы подвижного состава.

Теория надежности – общая научная дисциплина, изучающая общие методы и приемы, которых следует придерживаться при проектировании, изготовлении, приемке, транспортировке и эксплуатации изделий для обеспечения максимальной их эффективности в процессе использования [6].

Ее появление вызвано, главным образом:

- 1) ростом сложности современных технических систем (например, значительно увеличилось число составляющих их элементов);
- 2) ужесточением режимов их функционирования (работа при высоких и низких температурах, значительные механические нагрузки и др.);
- 3) высокой ценой отказа.

Основной целью теории надежности является:

- установление статистических закономерностей появления отказов в работе изделий;
- изучение причин отказов;
- научное обоснование общих принципов обеспечения требуемого уровня надежности изделий.

Таким образом, *теория надежности изучает процессы возникновения отказов объектов и способы предотвращения этих отказов*. Поэтому теорию надежности называют еще наукой об отказах. Эта наука на основании прогноза поведения системы разрабатывает теорию принятия оптимальных решений для обеспечения требуемого уровня надежности.

В вагоностроении и вагонном хозяйстве с помощью теории надежности дополнительно решаются следующие задачи:

- разработка норм и требований по надежности вагонов в стандартах и других документах, устанавливающих технические условия на их изготовление;
- оценка надежности нового вагона и проверка ее соответствия нормативным показателям;

- выбор оптимальной конструкции вагона, прогнозирование его состояния;
- разработка оптимальной системы технического обслуживания и ремонта вагонов;
- оценка технического уровня вагонов и использование этой информации для управления качеством изготовления и ремонта;
- определение потребности в запасных частях вагонов;
- определение требуемой вагоноремонтной базы;
- решение на научной основе вопросов текущего содержания вагонов в эксплуатации.

В современных условиях для повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции необходим *приоритет качества над количеством*. Особенно актуальна такая постановка вопроса для железнодорожного подвижного состава, к которому предъявляются высокие требования по обеспечению безопасности движения. Для таких технических средств *важной составляющей качества является надежность*.

Как известно, к железнодорожному подвижному составу относят локомотивы, грузовые вагоны, пассажирские вагоны локомотивной тяги и мотор-вагонный подвижной состав. В пособии вопросы надежности подвижного состава рассматриваются применительно к вагонному парку.

Надежность – это один из основных показателей качества изделий, проявляющийся во времени и отражающий изменения, происходящие в машине на протяжении всего времени ее эксплуатации. Она является зеркалом достижений в области проектирования, технологии и эксплуатации машин [28]. Поэтому *одной из основных проблем машиностроения, в том числе и вагоностроения, является проблема надежности*. Решение этой проблемы – огромный резерв повышения провозной способности железных дорог.

Ненадежный вагон не может эффективно функционировать, т.е. обеспечивать перевозочный процесс, так как *каждая его остановка из-за повреждения отдельных элементов или снижения технических характеристик ниже допустимого уровня, влечет за собой большие материальные убытки, а в отдельных случаях может иметь катастрофические последствия – гибель людей др.*

Как известно, промышленность даже передовых стран несет огромные потери из-за недостаточной надежности выпускаемых машин. За весь период эксплуатации затраты на ремонт и техническое обслуживание машин в связи с их износом в несколько раз превышают стоимость новой машины. Например, для автомобилей – до 6 раз, самолетов – до 5 раз, станков – до 8 раз, радиотехнической аппаратуры – до 12 раз [28]. Аналогичные затраты

для грузовых вагонов более чем в 4 раза превышают стоимость нового вагона [2].

Теория надежности предполагает следующие допущения:

- отказ рассматривается как случайное событие;
- надежность системы рассматривается на определенном отрезке времени и для заданных режимов и условий применения;

- надежность системы связана с понятием «заданная функция системы».

Теоретической основой науки о надежности являются:

- *математические методы*, позволяющие осуществлять оценку и прогнозирование надежности изделий и сложных систем, – теория вероятностей и математическая статистика; теория случайных процессов, методы оптимизации, теория информации и математическая логика и др;

- *результаты исследований естественных наук*, изучающих физико-химические процессы разрушения, старения и изменения свойств материалов, из которых изготовлены изделия или которые необходимы для их функционирования (топливо, смазка, и т.п.), – сопротивление материалов, физико-химическая механика, триботехника и др.;

- *достижения в области расчета и проектирования* изделий данного типа, а также технологии их изготовления, которые могут изменяться в процессе эксплуатации и производства изделий.

Таким образом, теория надежности базируется на фундаментальных математических и естественных науках, на тех их разделах и теоретических разработках, которые способствуют решению поставленных задач.

Цель учебного пособия – получение студентами знаний об общих методах, используемых при проектировании, изготовлении и эксплуатации подвижного состава требуемого уровня надежности.

Основными задачами пособия являются: изучение основных понятий теории надежности, показателей надежности подвижного состава и методов их расчета; планирования испытаний на надежность подвижного состава, использования показателей надежности для совершенствования конструкции и технологии изготовления подвижного состава.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1 Особенность проблемы надежности

Особенностью проблемы надежности является ее связь со всеми **этапами жизненного цикла вагона** – проектированием, изготовлением и эксплуатацией. На каждом этапе вносится свой вклад в решение задачи по созданию вагона требуемого уровня надежности.

Примечание – *Жизненный цикл* – период времени от начала проектирования машины и (или) оборудования до завершения утилизации [25].

Для обеспечения требуемого уровня надежности вагона необходимо, чтобы она закладывалась при его проектировании, обеспечивалась при изготовлении и поддерживалась при эксплуатации. Это, так называемая, триада надежности, которую необходимо строго соблюдать.

На этапе проектирования надежность зависит:

- от выбранной конструктивной схемы вагона;
- конструкции отдельных его узлов;
- примененных материалов;
- методов защиты от внешних воздействий;
- приспособленностью к техническому обслуживанию (ТО) и ремонту;
- и других конструктивных особенностей.

Этап проектирования является наиболее важным и эффективным для создания вагонов с требуемыми показателями надежности, используя в процессе проектирования общие принципы и методы теории надежности.

В теории надежности понятие «проектирование» трактуют в обобщенном смысле – как разработку изделия, составными частями которой является проектирование и конструирование.

Примечание – *Проектирование* (в широком смысле) – это комплекс работ по исследованиям, расчетам и конструированию, имеющих целью получение всей необходимой документации для создания новых изделий, удовлетворяющих заданным требованиям. Проектирование может включать несколько стадий – от подготовки технического задания до испытания опытных образцов.

Согласно ГОСТ 2.103-2013 к *основным стадиям разработки изделия* относятся: техническое задание, разработка проектной конструкторской документации (техниче-

ское предложение, эскизный проект, технический проект), разработка рабочей конструкторской документации на изделие (изготовление и испытание установочной серии или опытной партии, корректировка конструкторской документации по результатам изготовления и испытания, а также технологического процесса изготовления изделия).

Выбор конструктивной схемы. Например, конструктивная схема цистерны может быть с кузовом рамной и безрамной конструкции, пассажирского вагона – с рамой, имеющей сквозную хребтовую балку и с рамой, имеющей хребтовую балку в консольных частях, конструктивная схема тележки грузового вагона – с буксовым и центральным подвешиванием и др. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки.

Выбор конструкции отдельных узлов вагона. Необходимо выбирать конструкции узлов, обеспечивающих высокие назначенные и межремонтные сроки их службы с высокой вероятностью безотказной работы. Например, применение колес повышенного качества и надежности, а также буксовых узлов с кассетными подшипниками позволит обеспечить межремонтный пробег до 1 000 тыс. км.

Применение современных материалов. Например, использование для изготовления металлоконструкции кузовов вагонов сталей с высокими прочностными свойствами и высокой коррозионной стойкостью позволит уменьшить их массу при обеспечении необходимой прочности.

Методы защиты от внешних воздействий. К таким методам относятся применение антикоррозионных покрытий и покрытий, защищающих вагонные конструкции от вредного воздействия перевозимого груза, создание для вагонов специальных условий по температуре и влажности и др.

Как известно, основной причиной снижения несущей способности и разрушения металлических элементов кузовов вагонов является *коррозионный износ*. В условиях эксплуатации в результате коррозионного износа происходит уменьшение сечений элементов кузова, т. е. появляется необходимость учета изменения их прочностных свойств. Поэтому для элементов вагона следует применять коррозионностойкие стали.

Котлы цистерн для кислот и жидких химических грузов изготавливают из материалов, обеспечивающих качество перевозимых грузов и стойких против их разрушающего воздействия (2-слойные стали, нержавеющие стали, гуммирование внутренней поверхности).

Цистерны имеют *предохранительно-контрольные устройства*, необходимые для контроля давления и температуры. Например, в нефтебензиновых цистернах это предохранительно-впускной клапан, который регулирует давление в котле (предотвращает повышение давления в котле выше допустимого и возникновение в нем вакуума).

Цистерны для скоропортящихся и затвердевающих грузов для поддержания температурного режима груза в котле оборудованы *термоизоляцией*.

Цистерны для перевозки некоторых грузов (ацетальдегида, этиловой жидкости, хлора и аммиака) для предохранения котла от нагрева солнечными лучами, что может привести к перегреву груза, имеют *теневую защиту* в виде защитных экранов.

Приспособленность к ТО и ремонту. Приспособленность к осмотру, обнаружению неисправностей и ремонту характеризуется такими свойствами вагонных конструкций, как контролепригодность, доступность, легкоъемность, расчленяемость.

Указанные свойства вагонных конструкций необходимо закладывать на этапе проектирования.

На **этапе изготовления** надежность зависит:

- от точности и качества изготовленных деталей;
- методов контроля качества сборки вагона и его узлов;
- возможностей управления ходом технологического процесса;
- методов испытания новой продукции;
- и других показателей технологического процесса.

Например, для уменьшения или даже исключения в эксплуатации дефектов вагонных колес необходимо повышать качество их изготовления. Это актуально, поскольку в настоящее время межремонтный пробег колес грузовых вагонов эксплуатационного парка составляет немногим более 100 тыс. км. С целью повышения межремонтного пробега в грузовых вагонах нового поколения необходимо применять колеса улучшенного качества материала и повышенной твердости.

Для повышения качества колес повышенной твердости проведен комплекс работ по повышению металлургического качества колесной стали, а именно, внедрение продувки жидкой стали аргоном и внедрение установки «печь-ковш-вакууматор». Это позволило реализовать технологию термической обработки обода на более высокую твердость с обязательным дробеструйным упрочнением. Межремонтный пробег колес нового поколения увеличен до 900 тыс. – 1 млн км.

На **этапе эксплуатации** обеспечивается поддержка необходимого уровня надежности вагона с помощью технического обслуживания и ремонта.

П р и м е ч а н и е – Понятие «эксплуатация» включает в себя, помимо применения по назначению, техническое обслуживание, ремонт, хранение и транспортирование (ГОСТ 27.002–89).

Показатели надежности проявляются только *в процессе использования вагона* и зависят от методов и условий эксплуатации вагона, принятой системы ремонта и технического обслуживания, режимов работы и других эксплуатационных факторов. Например, допускаемая скорость соударения вагонов в эксплуатации – 9 км/ч, а реальная – 16 км/ч и более. Это приводит к повреждению вагонов.

Таким образом, для обеспечения требуемого уровня надежности вагона необходимо соблюдать приведенное выше правило: *закладывать надежность при проектировании, обеспечивать при изготовлении и поддерживать при эксплуатации.*

Если в процессе проектирования не заложены конструктивные решения, обеспечивающие безотказное функционирование всех элементов вагона, то эти недостатки порой невозможно устранить в процессе производства. В процессе создания вагона должны быть в полном объеме реализованы все решения, разработки и указания конструктора (проектировщика). При эксплуатации должны выполняться установленные инструкциями условия и правила эксплуатации; своевременно приниматься меры по изучению и устранению причин выявленных дефектов и неисправностей; анализироваться и обобщаться опыт использования устройств.

Следовательно, *проблема надежности – комплексная проблема.* Борьбу за надежность надо начинать с проектирования вагона и продолжать во время его изготовления и эксплуатации.

1.2 Основные понятия, термины и определения

Термины и определения надежности стандартизированы (ГОСТ 27.002). Терминология по надежности в технике распространяется на любые технические объекты. Понятие «объект» – обобщенное понятие, под которым в теории надежности понимают конкретные изделия и (или) их составные части.

Примечания (ГОСТ Р 27.002–2009)

1 *Изделие* – любая функциональная единица, которую можно рассматривать в отдельности.

2 *Составная часть* – рассматриваемая часть изделия.

Классификация основных терминов, используемых в теории надежности, приведена в таблице 1.1.

Объекты, рассматриваемые в теории надежности. Выходные параметры, характеризующие техническое состояние объектов. Применительно к вагонам *объектом исследования* могут быть вагон в целом и его составная часть (узел, сборочная единица, деталь), отдельная система (вентиляция, отопление, электрооборудование и др.), элемент системы.

Каждый объект характеризуется совокупностью выходных параметров, определяющих его техническое состояние. Их допустимые значения оговариваются в нормативно-технической и конструкторской документации (НТД и КД).

Об изменении технического состояния объекта судят по значениям контролируемых выходных параметров.

Таблица 1.1 – Классификация основных терминов теории надежности

| Объекты | Состояния объекта | События | Временные понятия | Свойства объекта |
|--|--|--------------------------------|--|--|
| Изделие Составная часть изделия Система Элемент системы Обслуживаемые объекты Необслуживаемые объекты Ремонтируемые объекты Неремонтируемые объекты Восстанавливаемые объекты Невосстанавливаемые объекты | Техническое Исправное Неисправное Работоспособное Неработоспособное Предельное Критическое | Повреждение Отказ Дефект | Наработка Ресурс Срок службы Время восстановления Срок сохранности | Надежность Безотказность Долговечность Ремонтопригодность Сохраняемость Готовность Живучесть Безопасность |

В частности, для вагонного колеса такими параметрами являются толщины гребня и обода, размеры проката, ползуна, навары и др., для вагона – грузоподъемность, масса, объем кузова, конструктивная скорость, габаритность и др. И их значения должны находиться в строго установленных пределах.

Примечания

1 *Техническое состояние объекта* – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект (ГОСТ 20911–89).

2 *Выходные параметры* – это параметры технической характеристики изделия, а также параметры внешнего вида, комфортности, обзорности, удобства обслуживания и другие, определяющие качество объекта.

3 К *нормативно-технической и конструкторской документации (НТД и КД)* относятся: ГОСТы, ОСТы, ТУ, РТМ, РД, Нормы, действующие Правила и Инструкции, рабочие чертежи завода-изготовителя.

Примеры полей допуска для выходных параметров по колесу грузового вагона:

- толщина гребня – 33–25 мм – для скорости движения до 120 км/ч (не более 33 и не менее 25 мм);
- толщина обода – 82–22 мм (не менее 22 мм);
- размер проката – 0–9 мм (не более 9 мм);
- размер ползуна и навары – 0–1 мм (не более 1 мм).

Среди выходных параметров можно выделить основные и второстепенные. *Основные параметры* характеризуют нормальное выполнение объектом требуемых функций, *второстепенные параметры* – параметры внешнего вида, комфортности, обзорности, удобства управления эксплуатации и др.

Под *требуемыми функциями* для вагона понимают его способность вы-

полнять перевозочную работу при обеспечении безопасности движения, сохранности перевозимых грузов или создании необходимого комфорта.

Основные виды технического состояния объекта. В процессе эксплуатации любой объект, в т. ч. и вагон, может находиться в одном из следующих видов технического состояния: исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном и предельном. Вид технического состояния определяется по результатам контроля технического состояния и технического диагностирования.

Примечания

1 Каждое техническое состояние характеризуется совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, а также качественных признаков, для которых не применяются количественные оценки (ГОСТ 27.002–89).

2 *Контроль технического состояния* – проверка соответствия значений параметров объекта, требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени (ГОСТ 20911–89).

3 *Техническое диагностирование* – определение технического состояния объекта (ГОСТ 20911–89).

Исправное состояние (исправность) – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям НТД и КД отношении основных и второстепенных параметров, т. е. всем требованиям НТД и КД. Если хотя бы одно из таких требований не выполняется, то объект находится в *неисправном состоянии*.

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям НТД и КД в отношении основных параметров (параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции). Если значение хотя бы одного из таких параметров не соответствует требованиям НТД и КД, то объект находится в *неработоспособном состоянии*.

Поясним теперь отличие понятий «исправность» и «работоспособность». Отличие исправного состояния от работоспособного заключается в том, что исправный вагон должен соответствовать как основным, так и второстепенным параметрам, а работоспособный – только основным параметрам.

Таким образом, работоспособный объект может быть неисправным, например, если он не удовлетворяет эстетическим требованиям. При этом ухудшение внешнего вида объекта не мешает его применению по назначению. Отсюда следует, что понятие «исправность» шире понятия «работоспособность». Исправный вагон обязательно работоспособный. Неисправный вагон также может быть работоспособным, но не наоборот.

Так, например, если деформирована лестница вагона-цистерны или нарушено лакокрасочное покрытие кузова пассажирского вагона или помята обшивка кузова, однако их основные параметры находятся в пределах нор-

мы, то вагоны считаются неисправными, но в то же время работоспособными. Эти неисправности вагонов не нарушают их работоспособность.

Следует отметить, что работоспособность объекта связана не только со «способностью работать», т.е. выполнять требуемые функции, но и с тем, чтобы при этом основные выходные параметры объекта находились в допустимых пределах. Например, прокат колеса грузового вагона более 9 мм. Вагон еще способен работать, но параметр проката колеса вышел за пределы норм, при которых обеспечивается нормальная работа.

П р и м е ч а н и е – Для сложных объектов возможны частично неработоспособные состояния, при которых объект способен выполнять требуемые функции с пониженными показателями или способен выполнять лишь часть требуемых функций (ГОСТ 27.002–89).

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Следовательно, объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности и эффективности.

Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации объекта. То есть возможны несколько видов предельных состояний.

Временное прекращение эксплуатации объекта имеет место при направлении его в ремонт. В этом случае предельное состояние совпадает с неработоспособным состоянием. Окончательное прекращение применения объекта по назначению предполагает его списание. Например:

- критерием предельного состояния (временного) поверхности катания колеса грузового вагона является прокат более 9 мм, что влечет за собой временное прекращение эксплуатации колеса и направление его в ремонт;

- критерием предельного состояния (окончательного) колеса грузового вагона является толщина обода менее 22 мм, пассажирского – 40 мм, что влечет за собой окончательное прекращение эксплуатации колеса и его списание;

- критерием предельного состояния (окончательного) поглощающего аппарата являются: появление трещин, изломы элементов конструкции аппарата или снижение энергоемкости поглощающего аппарата при максимальной силе на 30 % и более от исходного значения (для грузовых вагонов) и 10 % и более от исходного значения (для пассажирских вагонов);

- критерием предельного состояния вагона (временного) является превышение объема выполненной работы в километрах пробега или предельно допускаемой календарной продолжительности эксплуатации, необходимых для направления вагона в ремонт.

Критерии предельного состояния объекта, при достижении которых требуется его отправка в ремонт (средний или капитальный) или он подлежит списанию, устанавливаются НТД и КБ и эксплуатационной документацией. При этом для каждого объекта критерии являются индивидуальными.

Признаки предельного состояния, при котором грузовой или пассажирский вагон подлежит списанию, устанавливаются «Инструкцией по исключению вагона из инвентаря», признаки предельного состояния элементов определяются соответствующими правилами и инструкциями.

Характерными признаками нарушения работоспособности и наступления предельного состояния механической части вагонов являются:

- разрушение, пластическая деформация и потеря устойчивости несущих элементов от действия экстремальных нагрузок или наличия скрытых дефектов в материале конструкции;
- усталостные разрушения элементов в результате длительных многократных динамических нагружений;
- ослабление соединений элементов конструкции под действием вибрации;
- механический и коррозионный износ – предельное утонение элементов вследствие абразивного, контактного и коррозионного износа.

Критическое состояние – состояние объекта, которое может привести к гибели, травмированию людей или значительному материальному ущербу.

Примечание – Критическое состояние в отличие от предельного состояния не означает прекращения эксплуатации вагона, а может быть продолжена после устранения последствий опасного отказа.

Основные события теории надежности. В процессе эксплуатации объекты могут находиться в одном из перечисленных выше состояний (исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном, предельном) и переходить из одного состояния в другое.

Переход объекта из одного состояния в другое происходит вследствие появления одного из двух основных событий – повреждения или отказа.

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

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Поясним различие понятий «повреждение» и «отказ». В эксплуатации происходит процесс потери вагоном работоспособности, который выражается в изменении во времени выходных параметров элементов вагона и вагона в целом. *Если при этом выходные параметры не выходят за допустимые пределы, то мы имеем повреждение (неисправное, но работоспособ-*

ное состояние). Повреждение – это любое отклонение контролируемых параметров от начальных в пределах, установленных НТД и КД.

При выходе параметра за допустимые пределы мы имеем отказ (неработоспособное состояние). Следовательно, признаком возникновения отказа является выход значений любого из параметров, характеризующих работоспособность объекта, за пределы допусков.

Таким образом, переход объекта в неисправное состояние фиксирует факт повреждения, в неработоспособное состояние – факт отказа. В целом же, *повреждение и отказ – две формы проявления неисправности.*

Рассмотрим в качестве примера вагонное колесо. Как известно, качество вагонного колеса оценивается несколькими выходными параметрами: размерами проката, ползуна, навары, наличием выщербин и др. Так, размер проката колеса пассажирского вагона – одного из его выходных параметров – в пределах 0–7 мм – повреждение, более 7 мм – отказ колеса. Повреждение поверхности катания колеса в виде проката ухудшает не только выходные параметры колеса, но и приводит к ухудшению динамических качеств и безопасности движения – выходных параметров вагона. Любой отказ возникает или может возникнуть через некоторый период времени, который является случайной величиной.

В ГОСТ 15467–79 введено еще одно понятие, отражающее техническое состояние объекта – дефект.

Дефект – каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.

Если понятия «повреждение» и «отказ» относят к результатам внешнего воздействия на объект при его эксплуатации, то понятие «дефект» – к результату технологического процесса.

Обычно под дефектом понимают нарушение сплошности и состояния поверхности материала, а также отклонение качества материала по химическому составу и структуре от требований, предусмотренных техническими условиями. Например, дефекты металлов возникают из-за несовершенства или нарушения технологических процессов литья, сварки, обработки давлением и др.

К *дефектам процессов литья* относят неметаллические включения, шлаковины, усадочную пористость, раковины, газовую пористость и т.д., к *дефектам сварки* – трещины, коррозию и др., к *дефектам обработки давлением* – расслоения, заковы, закаты, волосины и др.

Дефекты металлов, допускаемые для одних условий работы, могут быть недопустимы для других.

Дефекты материалов неизбежны, поскольку являются побочными явлениями технологии литья, сварки и др. Поэтому их можно считать постоянно действующими факторами.

Дефекты разделяют на допустимые (требованиями НТД и КД) и недо-

пустимые, внутренние скрытые и поверхностные явные, критические и малозначительные, исправимые и неисправимые.

Внутренние дефекты металлов выявляются средствами неразрушающего контроля, поверхностные – визуально-оптическим методом.

Термин «дефект» связан с термином «неисправность», но не является его синонимом. Неисправность представляет собой определенное состояние изделия. Находясь в неисправном состоянии, изделие имеет один или несколько дефектов. При этом дефект рассматривается как возможная причина отказа.

Основные временные понятия теории надежности. К ним относятся наработка, время восстановления, ресурс, срок службы и срок сохраняемости.

Примечание – В теории надежности понятие «время» трактуют в обобщенном смысле – как параметр, характеризующий последовательность событий и смены состояний. В этом случае отсутствует принципиальная разница между наработкой и временем. Поэтому понятия «наработка» и «ресурс» отнесены к категории временных понятий.

Н а р а б о т к а – продолжительность или объем работы объекта.

Примечания

1 Нарботку не следует смешивать с календарной продолжительностью эксплуатации. К понятию наработки придем, выделяя из суммарного времени эксплуатации объекта чистое время, в течение которого он использовался по назначению. Например, наработка вагона за один календарный год может составлять всего 3000 ч, хотя продолжительность одного года составляет 8760 ч.

2 Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километрах пробега и т.п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков, дней, месяцев и т.п.) (ГОСТ 27.002–89).

3 *Если объект работает непрерывно*, то наработку можно измерять в единицах календарного времени. При работе объекта с перерывами различают *непрерывную и суммарную наработку*. В этом случае наработку также можно измерять в единицах времени.

4 *Если физический износ объекта зависит* не только от календарной продолжительности эксплуатации, но и *от интенсивности его эксплуатации*, то наработку обычно выражают через объем произведенной работы или число рабочих циклов.

Нарботка может иметь различную размерность и физический смысл, что определяется характером работы объекта. Например, *наработка вагона* может быть в сутках, днях, километрах пробега, пассажиро-километрах, тонно-километрах, вагоно-километрах; *подшипника качения* – в километрах пробега или числе оборотов; *пружин рессорного подвешивания* – в количестве амплитуд или размахов колебаний; *гидравлического гасителя* – в количестве рабочих ходов штока и поршня при сжатии и растяжении; *колесной пары* – в километрах пробега; *поглощающего аппарата* – в количестве введенной энергии и т.д.

Различают наработку до отказа и между отказами.

Наработка до отказа – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

Наработка между отказами – наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа. Например, средняя наработка на отказ пассажирского вагона составляет 105 дней, или 45 тыс. км.

Время восстановления – продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта.

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

Примечания

1 Под началом применения по назначению понимают начало эксплуатации объекта после постройки или начало возобновления эксплуатации после ремонта. В зависимости от выбора начального момента времени понятие ресурса получает различное толкование.

2 В физическом смысле ресурс объекта – это заложенная при его проектировании и изготовлении способность сопротивляться внешним воздействиям. Количественно ресурс измеряется в единицах наработки. Под внешним воздействием понимают воздействия нагрузок, окружающей среды и человека.

В теории надежности различают назначенный, остаточный, доремонтный, межремонтный, послеремонтный, полный и технический ресурсы.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Доремонтный ресурс исчисляют до первого деповского или капитально-ремонтного ремонта. Число возможных видов *межремонтного ресурса* зависит от чередования капитальных и деповских ремонтов. *Послеремонтный ресурс* отсчитывают от последнего деповского или капитального ремонта.

Полный ресурс исчисляют от начала эксплуатации объекта до его перехода в предельное состояние, соответствующее окончательному прекращению эксплуатации.

Технический ресурс представляет запас возможной наработки объекта.

Примечание – Нарботка индивидуального объекта до первого отказа, его наработка между отказами и ресурс могут быть определены лишь после того, как наступил отказ или было достигнуто предельное состояние.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта от начала его применения по назначению до предельного состояния.

По аналогии с ресурсом различают назначенный, остаточный, доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный (до списания) сроки службы. Полный срок службы включает, как правило, продолжительность всех видов ремонта.

Тогда, *назначенный срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Примечания

1 Ресурс отличается от срока службы тем, что учитывает интенсивность эксплуатации объекта, а не календарную продолжительность применения по назначению. Причем от интенсивности использования объекта зависит соотношение значений ресурса и срока службы.

2 Назначенный ресурс и назначенный срок службы относятся к технико-экономическим характеристикам вагона и поэтому не являются показателями надежности (показателями долговечности).

3 Целью установления назначенного срока службы и назначенного ресурса является обеспечение принудительного заблаговременного прекращения эксплуатации объекта.

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции.

Основные виды срока сохраняемости выделяют аналогично сроку службы.

Назначенный срок хранения – календарная продолжительность хранения, при достижении которой хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

Результаты эксплуатации вагонов показывают, что основные временные показатели – наработка до отказа, наработка между отказами, а также ресурс, срок службы и срок сохраняемости характеризуются значительным статистическим разбросом. Это обусловлено различием в условиях и режимах эксплуатации вагонов.

Пример 1.1. Система ремонта вагонов нового поколения со сроком службы 32 года и общим пробегом 2 500 тыс. км характеризуется следующей последовательностью интервалов между постройкой (П), деповскими (ДР) и капитальными (КР) ремонтами:

$$П \Rightarrow \frac{4}{500} \Rightarrow ДР \Rightarrow \frac{4}{250} \Rightarrow ДР \Rightarrow \frac{4}{250} \Rightarrow ДР \Rightarrow \frac{4}{250} \Rightarrow КР \Rightarrow \dots$$

Показан фрагмент до первого капитального ремонта. Критерии отбора вагонов в ремонт представлены в виде дроби. В числителе – предельно допускаемая календарная продолжительность использования вагона в перевозочном процессе, в знаменателе – объем выполненной работы в тысячах километрах пробега.

Отсюда:

- назначенный доремонтный срок службы (доремонтный ресурс) до первого деповского ремонта – 4 года или 500 тыс. км;
- назначенный доремонтный срок службы (доремонтный ресурс) до первого капитального ремонта – 16 лет или 1250 тыс. км;

- назначенный межремонтный срок службы (межремонтный ресурс) (срок службы, или ресурс от одного вида ремонта до другого) – 4 года или 250 тыс. км;
- назначенный полный срок службы, или полный ресурс – 32 года или 2500 тыс. км.

Цель установления назначенного ресурса и назначенного срока службы – обеспечить принудительное заблаговременное прекращение применения объекта по назначению, исходя из требований безопасности или технико-экономических соображений. *При достижении объектом назначенного ресурса (назначенного срока службы)* объект может быть списан, направлен в деповской или капитальный ремонт, передан для применения не по назначению, или может быть принято решение о продолжении эксплуатации.

Например, назначенный ресурс поглощающих аппаратов пассажирского и грузового вагонов должен составлять соответственно не менее 25 МДж и 250 МДж введенной энергии (суммарной энергии, воспринятой аппаратом в процессе статических и динамических нагружений).

П р и м е р ы назначенных сроков службы вагонов и их узлов:

- пассажирский вагон с кузовом из малоуглеродистой и низколегированной сталей – 28 лет;
- то же с кузовом из коррозионностойких материалов – 40 лет;
- универсальные платформа и крытый вагон, а также цистерна нефтебензиновая – 32 года;
- вагон-хоппер для зерна – 30 лет;
- полувагон – 22 года с вероятностью 85 %;
- цистерна для улучшенной серной кислоты – 18 лет;
- полувагон для перевозки окатышей и агломерата – 15 лет;
- 2-осная тележка грузового вагона – 30 лет (по ресурсу боковых рам и наддрессорной балки);
- тележка пассажирского вагона – 40 лет (по ресурсу рамы и наддрессорной балки).

Основные виды объектов исследования теории надежности. В теории надежности выделяют следующие виды объектов изучения: обслуживаемые и необслуживаемые, ремонтируемые и неремонтируемые, восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

Обслуживаемый объект – объект, для которого проведение технического обслуживания предусмотрено НТД и КД.

Необслуживаемый объект – объект, для которого проведение технического обслуживания не предусмотрено НТД и КД.

Ремонтируемый объект – объект, ремонт которого возможен и предусмотрен НТД и КД.

Неремонтируемый объект – объект, ремонт которого невозможен и не предусмотрен НТД и КД.

Восстанавливаемый объект – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в НТД и КД.

Невосстанавливаемый объект – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в НТД и КД.

Примечания

1 Восстанавливаемые объекты при возникновении отказа не изымаются из эксплуатации, а подлежат восстановлению и дальнейшему использованию. То есть при их эксплуатации могут иметь место многократно повторяющиеся отказы.

2 Проведение (или непроведение) технического обслуживания и ремонта объектов на протяжении срока их службы предусматривают при разработке объекта. При этом объект может быть ремонтируемым, но не восстанавливаемым в конкретной ситуации.

3 *Техническое обслуживание* – комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании (ГОСТ 18322–78). В техническое обслуживание входят контроль технического состояния, очистка, смазывание и др.

4 *Восстановление* – процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного (ГОСТ 27.002–89). Восстановление включает в себя идентификацию отказа, наладку или замену отказавшего элемента, регулирование и контроль технического состояния элементов объекта и заключительную операцию контроля работоспособности объекта в целом.

5 *Ремонт* – комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий и восстановлению ресурсов изделий или их составных частей (ГОСТ 18322–78). В ремонт, как правило, входит разборка, дефектовка, замена или восстановление отдельных блоков, деталей и сборочных единиц, сборка и др.

При эксплуатации вагоны расходуют свой технический ресурс и теряют работоспособность и, следовательно, их необходимо восстанавливать, направляя вагоны в ремонт. Поэтому вагоны относятся к обслуживаемым, ремонтируемым объектам.

Различают текущий, средний и капитальный ремонты. Два последних относят к плановым видам ремонта. Они различаются степенью восстановления ресурса объекта. В системе технического обслуживания и ремонта вагонов под средним ремонтом понимают деповской ремонт.

Примечания (ГОСТ 18322–78).

1 *Текущий ремонт* – ремонт, выполняемый для обеспечения или восстановления работоспособности изделия и состоящий в замене и (или) восстановлении отдельных частей.

2 *Средний ремонт* – ремонт, выполняемый для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса изделий с заменой или восстановлением составных частей ограниченной номенклатуры и контролем технического состояния составных частей, выполняемом в объеме, установленном в НТД.

3 *Капитальный ремонт* – ремонт, выполняемый для восстановления исправности и полного или близкого к полному восстановлению ресурса изделия с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые.

В то же время входящие в состав вагона детали (изделия) могут быть ремонтируемыми и неремонтируемыми (рисунок 1.1).

Примечание – Любой объект, состоящий из нескольких съемных элементов, является ремонтируемым, но не наоборот. Ремонтируемый объект не обязательно

является составным. К классу ремонтируемых относят большинство машин и их сборочных единиц.

К *неремонтируемым* изделиям относят тормозные колодки, электрические лампочки, корпуса поглощающих аппаратов с трещиной, фрикционные клинья поглощающего аппарата, ролики подшипников качения, элементы электроники, подшипники качения, оси колесных пар, пружины, рессоры, клиновые ремни и др.



Рисунок 1.1 – Классификация видов объектов

В свою очередь ремонтируемые изделия делятся на восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

Следует иметь в виду, что *в зависимости от конкретных условий, при которых обнаружен отказ*, одно и то же изделие вагона может быть восстанавливаемым или невосстанавливаемым. Так, в условиях депо или ВРЗ вагон должен рассматриваться как ремонтируемое восстанавливаемое изделие, в пределах перегона – как ремонтируемое невосстанавливаемое изделие.

Невосстанавливаемость на перегоне обусловлена ограниченностью времени восстановления и отсутствия необходимых средств и условий.

Поврежденный корпус автосцепки в условиях депо – восстанавливаемое изделие, а в условиях, когда указанное повреждение обнаружено на технической станции при осмотре грузового поезда – невосстанавливаемое. Ввиду ограниченного времени стоянки и отсутствия соответствующей базы для восстановления его заменяют на новый или ранее отремонтированный.

П р и м е ч а н и е – Следует иметь в виду, что в общем случае ремонтируемые объекты, например колеса колесных пар, при достижении некоторой наработки, когда их размеры выходят за допустимые пределы, становятся неремонтируемыми.

Надежность объекта и его основные свойства. *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, хранения и транспортирования (ГОСТ 27.002–89).

Или иначе, *надежность* – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах (в пределах поля допуска) значения всех основных параметров в нормированных (заданных) условиях эксплуатации.

Надежность – внутреннее свойство объекта. Оно проявляется во взаимодействии этого объекта с другими объектами, а также с внешней средой. Надежность отражает все изменения, происходящие в изделии на протяжении всего времени его эксплуатации.

Надежность объекта – комплексное свойство, характеризующееся следующими частными свойствами – безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью и готовностью.

Расчленение надежности на отдельные свойства обеспечивает возможность ее детального и всестороннего анализа. При этом для неремонтируемых объектов основным свойством может являться безотказность, для ремонтируемых объектов – ремонтпригодность.

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

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

П р и м е ч а н и е – *Безотказность* рассматривает как бы самостоятельную непрерывную работу объекта без каких-либо вмешательств для поддержания работоспособности. *Долговечность* объекта, наоборот, рассматривает работу объекта за весь период его эксплуатации и учитывает, что длительная работа объекта невозможна без ремонтных и профилактических мероприятий, восстанавливающих работоспособность, утрачиваемую в процессе эксплуатации.

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

Ремонтпригодность объекта можно расчленить на более конкретные свойства, характеризующие эксплуатационную технологичность: обслуживаемость, контролепригодность, доступность, приспособленность к диагностированию и легкосъемность.

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

Готовность – способность изделия выполнить требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены (ГОСТ Р 27.002–2009).

П р и м е ч а н и я

1 Таким образом, являясь комплексным свойством, надежность объекта оценивается через показатели частных свойств (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и готовности).

2 В зависимости от назначения объекта и условий его применения надежность может включать все указанные выше свойства или определенные сочетания этих свойств. Например, для неремонтируемых объектов основным свойством может являться безотказность. Для ремонтируемых объектов одним из важнейших свойств, составляющих понятия надежности, может быть ремонтпригодность.

Безопасность и живучесть объекта. Подвижной состав относится к объектам, которые являются потенциальным источником опасности, Для таких объектов важными понятиями являются «безопасность» и «живучесть».

Безопасность – свойство объекта при изготовлении и эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды.

Безопасность не входит в общее понятие надежности, однако при определенных условиях тесно связана с этим понятием, например, если отказы могут привести к условиям, вредным для людей и окружающей среды сверх предельно допустимых норм. Например, неисправность сливного прибора цистерны может привести к утечке нефти и загрязнению окружающей среды. Отказ климатической установки в жаркое время года или системы отопления в холодное время могут создавать угрозу здоровью пассажиров. Поэтому общим для понятий «надежность объекта» и «безопасность объекта» является то, что они связаны с внезапными отказами объекта, приводящими к непоправимым последствиям.

К отказам, которые могут возникнуть внезапно, относятся ползун, разрушение буксового подшипника, обрыв триангеля или подвески башмака. Элементы, отказы которых влияют на безопасность и могут привести к аварийной ситуации, находятся в ходовой части, ударно-сцепном оборудовании, кузове, тормозной системе и электрооборудовании.

Примечание – Таким образом, к понятию «безопасность объекта» могут быть отнесены не все отказы, а только те из них, которые могут привести к непоправимым последствиям.

Понятие «живучесть» занимает пограничное место между понятиями «надежность» и «безопасность». В ГОСТ 27.002–89 приведено несколько определений понятия «живучесть».

Живучесть – свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта; или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации; или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов.

Примеры – сохранение несущей способности элементами конструкции при возникновении в них усталостных трещин, размеры которых не

превышают заданных значений, а также при воздействии на конструкцию ненормируемых нагрузок.

Отсюда следует, что живучесть характеризует скрытый и не учитываемый запас прочности конструкций.

Показатели надежности. Надежность объекта и его основные свойства оцениваются системой показателей надежности, которые имеют вероятностную природу. Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

В теории надежности выделяют следующие разновидности показателей надежности:

- **единичный**, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта;

- **комплексный**, который характеризует несколько свойств, составляющих надежность объекта. Например, безотказность и ремонтпригодность;

- **расчетный**, значения которого определяются расчетным методом;

- **экспериментальный**, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний;

- **эксплуатационный**, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации.

Различают следующие **единичные показатели** надежности, характеризующие основные свойства надежности.

а) безотказности:

- вероятность безотказной работы;
- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов;
- средняя наработка до отказа;
- средняя наработка на отказ;
- осредненный параметр потока отказов;
- гамма-процентная наработка до отказа;

б) долговечности:

- средний ресурс;
- средний срок службы;
- гамма-процентный ресурс;
- гамма-процентный срок службы;

в) ремонтпригодности:

- вероятность восстановления;
- гамма-процентное время восстановления;
- среднее время восстановления;

- интенсивность восстановления;
- средняя трудоемкость восстановления;
- г) *сохраняемости*:
 - гамма-процентный срок сохраняемости;
 - средний срок сохраняемости;
- д) *готовности* – коэффициенты готовности, оперативной готовности, технического использования и сохранения эффективности.

1.3 Отказы вагонов и их элементов

Основные причины отказов. Как известно, отказ – это одно из основных понятий, используемых в теории надежности, а наработка изделия до наступления отказа – основной объект количественного анализа в теории надежности.

Отказы представляют собой результат взаимодействия объекта как физической системы с другими объектами и окружающей средой.

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

Механизм отказа – механический, физический или химический процесс, который приводит к отказу.

Последствия отказа – явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.

Отказ возникает вследствие изменения параметров изделия или его частей под влиянием внутренних физико-химических процессов и воздействия внешней среды. Внешним проявлением отказа могут быть излом, поломка, деформация, износ и коррозия, превышающие предельные их значения.

Основными причинами отказов вагонов и их элементов являются:

- *конструкционные* – нарушения установленных правил и норм проектирования и конструирования;
- *технологические* – нарушения установленного процесса изготовления или ремонта;
- *эксплуатационные* – нарушения установленных правил и условий эксплуатации;
- *механические, физические и химические процессы*, изменяющие за время эксплуатации параметры вагона или его частей (износ, коррозия, усталость, старение, деформация).

При оценке надежности объектов рекомендуется не учитывать отказы, причиной которых являются нарушения установленных правил и норм проектирования, изготовления и эксплуатации, т.е. конструкционные, технологические и эксплуатационные отказы. Эти три вида причин отказов не имеют ничего общего со свойством надежности конструкции.

В связи с этим рассмотрим более подробно причины отказов, обусловленные механическими, физическими и химическими процессами, приводящие к ухудшению выходных параметров изделия.

Основные процессы, приводящие к ухудшению выходных параметров деталей и узлов вагона. В процессе эксплуатации вагона в его узлах и деталях под влиянием внешних и внутренних воздействий происходят процессы, снижающие начальные параметры отдельных деталей и вагона в целом. Эти процессы связаны, как правило, со сложными физико-химическими явлениями и приводят к различным видам повреждений (деформации, износу, коррозии и др.), а впоследствии и к отказам.

К основным процессам, снижающим работоспособность элементов вагона и приводящим к их отказам, относятся:

- усталостное разрушение деталей;
- коррозионное разрушение деталей;
- пластическая деформация деталей;
- изнашивание трущихся поверхностей;
- механическое повреждение деталей.

Усталостное разрушение деталей происходит в результате систематического воздействия на деталь динамических нагрузок. К деталям, подверженным усталостному разрушению, относятся детали ходовых частей и автосцепного устройства вагонов, работающих в условиях интенсивного вибрационного нагружения.

Внезапные усталостные изломы осей, колес, боковых рам и надрессорных балок тележек происходят, как правило, из-за наличия в них внутренних дефектов прокатного и металлургического происхождения (шлаковые включения, усадочные раковины и др.), которые являются концентраторами напряжений и причиной образования и последующего роста усталостных трещин.

Усталостное разрушение материала не обязательно должно привести к поломкам детали. Возможно возникновение усталостных трещин, которые до определенных размеров незначительно снижают работоспособность изделия, и опасность представляет в основном возможность их быстрого роста, приводящая к снижению несущей способности элемента конструкции вагона.

В качестве примера можно привести колесную пару, которая работает в наиболее неблагоприятном жестком динамическом режиме нагружения. Нестационарный режим нагружения при вращении колесной пары вызывает в оси и колесах переменные напряжения с амплитудами изменяющейся величины, что требует применения специальных мер, повышающих усталостную прочность оси и колес. Увеличение усталостной прочностью (предела выносливости) оси обеспечивается повышением чистоты обработки (механическая обработка всех элементов оси и шлифовка шеек и подступичных

частей), а также поверхностным упрочнением оси по всей длине (упрочняющая накатка роликами или комбинированный способ – сочетание закалки токами высокой частоты с упрочняющей накаткой).

Коррозионное разрушение деталей. *Коррозия металлов* – разрушение поверхности металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с внешней (коррозионной) средой [28].

Различают атмосферную, электрохимическую и химическую (газовую) коррозию.

Атмосферной коррозии подвергаются наружные поверхности вагона при действии на них атмосферных осадков и влажного воздуха.

Как известно, интенсивному коррозионному износу подвергаются прежде всего кузова грузовых и пассажирских вагонов. Коррозия является одной из основных причин снижения несущей способности кузовов вследствие уменьшения рабочего сечения элементов и нередко приводит к появлению сквозных коррозионных повреждений кузова.

Для предотвращения коррозии применяют специальные стали – нержавеющие и коррозионностойкие (в металл которых вводят компоненты, устойчивые к коррозии), наносят на поверхность металла защитные покрытия на основе других металлов (хромирование, никелирование и т.п.), используют окраску изделий.

Протеканию процессов *электрохимической коррозии* способствует неоднородность материала, когда отдельные участки поверхности обладают различными значениями электродного потенциала.

Опыт создания комбинированного сталеалюминиевого кузова пассажирского купейного вагона (1963 г.), у которого рама стальная, а стены и крыша из алюминиевых сплавов, показал, что в местах соединения элементов из алюминиевых сплавов и стали возникает электрокоррозия, вызванная различным химическим составом этих материалов. Контакт этих материалов приводит к возникновению электрохимической пары и разрушению алюминия. Во избежание электрохимической коррозии места соединения стальных деталей с деталями из алюминиевых сплавов необходимо тщательно защищать. Так, контактные поверхности стальных деталей оцинковываются и покрываются грунтом. Алюминиевые сплавы также покрывают грунтом.

Химической коррозии подвергаются кузова грузовых вагонов, используемые для перевозки агрессивных (коррозионно-активных) грузов (минеральные удобрения, меланж, серная кислота, аккумуляторная кислота и др.), имеют реальный срок службы значительно ниже назначенного срока службы. Это вагоны-минераловозы и котлы цистерн. Так, котлы цистерн для меланжа и серной кислоты уже на 2–3-й год эксплуатации имеют значительные коррозионные повреждения, обусловленные химической активно-

стью груза, а после 6–7 лет цистерны исключаются из оборота. У вагонов-цистерн для меланжа уже на 3–4-й год эксплуатации наблюдаются сквозные коррозионные повреждения.

Поэтому котлы цистерн, используемых для перевозки химических грузов, необходимо изготавливать из материалов, обеспечивающих качество перевозимых грузов и стойких против их разрушающего воздействия (2-слойные стали, нержавеющие стали, гуммирование внутренней поверхности).

Пластическая деформация возникает при перегрузках деталей и остается после удаления нагрузки. Простейшие виды этой деформации – растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб.

Вследствие пластической деформации происходит изменение геометрической формы деталей (смятие поверхности катания обода колеса, остроконечный накат гребня, навар, круговой наплыв металла на фаску обода колеса, местное уширение обода, изогнутость оси, прогибы и деформация крышек люков и торцовых дверей полувагонов, искривление осей и валов, осадка пружин и др.). В частности, смятие – это макроскопическая объемная пластическая деформация металла деталей вагонов, которая сопряжена с изменением формы при нагрузках выше предела текучести. Смятие поверхности катания ободьев колес имеет место в результате взаимодействия колес с рельсами. В этом случае объемная деформация связана, как правило, с превышением допустимых осевых нагрузок.

Изнашивание трущихся поверхностей. Износ имеет место при контакте двух поверхностей, особенно при их относительном перемещении, т.е. *износ* – это результат взаимодействия твердых тел при трении.

Изнашивание – процесс изменения размеров, формы, массы или состояния поверхности объекта вследствие разрушения его поверхностного слоя при трении. Это сложный физико-химический процесс, который может сопровождаться коррозией, усталостью и деформацией.

Результатом изнашивания является *износ* – один из основных видов разрушения деталей машин и конструкций. Около 80% от общего количества отказов механических систем, в том числе и вагонов, происходит именно из-за износа их подвижных соединений.

Различают механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое изнашивание. К *механическому изнашиванию* относятся абразивное, усталостное и др.

Применительно к деталям и сопряжениям вагонов наибольшее распространение имеет абразивное изнашивание. При нем происходит истирание поверхности трения за счет скалывания микронеровностей или режущего воздействия на поверхность абразивных включений. Абразивному износу подвергаются шарнирные соединения и пары трения колесо – рельс, колесо –

тормозная колодка, фрикционная планка – фрикционный клин, фрикционный клин – наклонная поверхность надрессорной балки, пятник вагона – подпятник тележки, скользя вагона – скользя тележки, направляющие боковых рам и корпусов букс и др.

Молекулярно-механическому изнашиванию (изнашиванию при заедании) подвержены детали, на трущихся поверхностях которых возникают высокие контактные нагрузки, приводящие к молекулярным сцеплениям, что в свою очередь, вызывает схватывание и заедания. К таким деталям относятся пары трения колесо – рельс, пятник вагона – подпятник тележки, скользя вагона – скользя тележки.

Коррозионно-механическое изнашивание является результатом трения материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой. Оно подразделяется на окислительное и фреттинг-коррозионное изнашивания.

Окислительное изнашивание – процесс механического разрушения окисных пленок, возникающих на поверхностях трения при взаимодействии с химически активной (коррозионной) средой. Окислительное изнашивание наблюдается в узлах трения, работающих в коррозионных средах или при высоких температурах.

Фреттинг-коррозионное изнашивание возникает при трении скольжения с малыми возвратно-поступательными перемещениями, при которых происходит разрушение окисных пленок без удаления их из зоны трения. Этот вид изнашивания наблюдается в гнездах подшипников качения – узле соединения корпуса буксы и подшипника качения.

Механическое повреждение деталей возникают в результате высоких динамических нагрузок, попадания в изделие посторонних предметов и крупных абразивных элементов, аварийных ударов, ранее незамеченных производственных дефектов (литейных раковин, газовых пустот), некачественной термической обработки деталей и др. К механическим повреждениям относятся внутренние и наружные трещины, литейные раковины, пробоины, риски и задиры, выкрашивание поверхностного слоя, вмятины, скручивание и изгибы, и, наконец, поломки и обломы.

Классификация отказов. Отказы классифицируют следующим образом.

По последствиям или по критичности различают *отказы критические и некритические* (некритические существенные или несущественные).

Критерием для классификации по критичности могут служить уровень прямых и косвенных потерь, вызванных отказами, затраты труда и времени на устранение последствий отказов, продолжительность простоев из-за возникновения отказов, степень снижения производительности при отказе и др.

В зависимости от последствий различают отказ вагона – критический отказ и отказ элемента вагона – некритический отказ.

Отказом вагона является любая неисправность, при которой он не может быть включен в состав поезда или не допускается его следование в составе поезда. Эти неисправности оговорены действующими Инструкциями и ПТЭ. Например, в соответствии с Инструкцией осмотрщику вагонов не допускается выпускать в эксплуатацию и к следованию в поездах вагоны, колесные пары которых имеют трещину в любой части оси или трещину в ободе, диске и ступице колеса, а также при наличии остроконечного наката на гребне колеса.

Отказом элемента вагона является любая техническая неисправность элемента вагона, требующая его замены и устраняемая за время, отведенное для технического обслуживания в поезде. В противном случае это будет уже отказ вагона.

Например, на промежуточной станции на колесе обнаружен навар. Если величина наvara более 2 мм, то вагон дальше следовать не может. Это отказ вагона. Если величина наvara не более 2 мм, то вагон может следовать в составе поезда до ближайшего пункта технического обслуживания, имеющего оборудование для смены колесной пары. Это будет отказ элемента – колесной пары.

К критическим отказам можно отнести также *ресурсный отказ*, в результате которого объект достигает предельного состояния. Например, толщина обода колеса менее 22 мм.

По влиянию на перевозочный процесс различают отказы первой, второй и третьей категорий.

Отказ первой категории приводит к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 час и более, либо к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта. *Отказ второй категории* вызывает задержку пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) продолжительностью от 6 минут до 1 часа либо ухудшение эксплуатационных показателей. *Отказ третьей категории* – это отказ, не имеющий последствий, относящихся к отказам первой и второй категорий.

По степени опасности различают отказы *опасные* и *неопасные*. Опасные могут привести к аварийной ситуации, создающей угрозу безопасности пассажиров или приводящей к загрязнению окружающей среды.

По характеру изменения основного параметра объекта до момента возникновения отказа отказы могут быть внезапные и постепенные. *Внезапный отказ* характеризуется скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Он обусловлен непредвиденными внезапными концентрациями внешних нагрузок и внутренних напряжений, превышающих расчетные. Поэтому наступление его не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием.

Внезапные отказы носят случайный характер. К ним можно отнести излом шейки оси, деформация, обрыв элемента, например подвески тормозного башмака и др.

Постепенный отказ возникает в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. В вагонных конструкциях они обычно возникают в результате изнашивания, старения, коррозии и других процессов.

В зависимости от связи между отказами различают отказы зависимые и независимые. *Зависимый отказ* обусловлен другими отказами, *независимый* не обусловлен другими отказами.

Выход из строя подвагонного генератора приводит к отключению системы электроснабжения. Отказ воздухораспределителя снижает эффективность системы торможения. Несвоевременное обнаружение недопустимого нагрева букс приводит к изломам шеек осей колесных пар от перегрева. Это примеры зависимых отказов.

По причинам возникновения отказы могут быть *конструктивные, производственные, эксплуатационные, вследствие изнашивания, вследствие старения.*

Конструктивный отказ обусловлен ошибками, допущенными при конструировании; производственный – нарушением принятой технологии изготовления или ремонта; эксплуатационный – несоблюдением правил эксплуатации.

По времени возникновения различают отказы ранние и поздние (деградационные).

Ранний (прирабочный) отказ проявляется на начальной стадии эксплуатации объекта под влиянием дефектов, не обнаруженных в процессе изготовления, испытаний и (или) приемочного контроля.

Деградационный (поздний) отказ обусловлен естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

В принципе можно практически исключить возникновение ранних отказов, если до передачи объекта в эксплуатацию провести приработку, обкатку, технологический прогон и др.

В зависимости от наличия внешних проявлений или возможности обнаружения различают явный и скрытый отказы. *Явный отказ* обнаруживается визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению, а *скрытый* не обнаруживается визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

По характеру деградационного процесса, приводящего к отказу, различают отказы *усталостные, коррозионные, износовые* и др.

Контроль технического состояния грузовых вагонов в эксплуатации. Существующая система обнаружения неисправностей грузовых вагонов исходит из обезличенности их эксплуатации и технического обслуживания. Обезличенность обусловлена тем, что грузовые вагоны не закрепляются за определенным депо и бесперегрузочно обращаются по всей сети железных дорог.

Пассажирские вагоны, в отличие от грузовых, обращаются по определенным маршрутам и возвращаются в депо приписки, где производятся основные работы по их техническому обслуживанию и ремонту. Поэтому их эксплуатация подобна эксплуатации других транспортных средств.

Рассмотрим действующую систему обнаружения неисправностей грузовых вагонов в эксплуатации.

В условиях эксплуатации для своевременного обнаружения повреждений и отказов грузовых вагонов осуществляется обязательный контроль их технического состояния. Для этого на станциях сети железных дорог имеются специализированные линейные пункты – ПТО, ПКТО, КП, ПТП, которые размещены:

- *ПТО* (пункт технического обслуживания) – на станциях массовой погрузки-разгрузки и на узловых сортировочных станциях;
- *ПКТО* (пункт контрольно-технического обслуживания) – на технических станциях, а также на станциях, предшествующих затяжным спускам;
- *КП* (контрольный пункт) – на промежуточных станциях через 25–35 км;
- *ПТП* (пункт технической передачи вагонов) – на станциях примыкания подъездных путей крупных промышленных предприятий.

Контроль осуществляется средствами технической диагностики (СТД) и группами осмотровиков вагонов.

К основным СТД относится система КТСМ (комплекс технических средств многофункциональный). Это система автоматического контроля технического состояния (диагностики) подвижного состава, которая может включать одну или несколько подсистем контроля наиболее ответственных узлов подвижного состава (букс, колес, тормозов, габаритов и др.). В частности, комплекс КТСМ-02 оснащен подсистемами контроля буксовых узлов, заторможенных колес и, при необходимости, контроля волочащихся деталей, дефектов колес, перегруза вагонов и др.

Комплексы КТСМ-02 осуществляют контроль состояния узлов вагона в движущемся поезде. Основной подсистемой комплекса является подсистема обнаружения неисправностей буксовых узлов. Работа подсистемы основана на принципе улавливания инфракрасного излучения нагретых букс. Как известно, внешним проявлением ненормальной работы буксы является повышенная температура ее корпуса, поскольку многие повреждения под-

шипников, нарушения технологии монтажа и другие отступления, как правило, повышают температуру нагрева букс. Поэтому для контроля технического состояния букс в пути следования комплекс оснащен устройствами бесконтактного теплового контроля букс.

К устройствам теплового контроля (тепловой диагностики) комплекса КТСМ-02 относятся правое и левое считывающие устройства (напольные камеры), которые содержат приемники инфракрасного излучения с оптической системой и приемные капсулы, датчики счета колес и температуры окружающего воздуха, а также рельсовую цепь, фиксирующую заход поезда в зону контроля.

Напольные камеры располагают по двум сторонам колеи в количестве двух или четырех. Оптическая система напольной камеры ориентирована на сканирование задней по ходу движения поезда стенки корпуса буксы. Принимая сигнал теплового излучения от нижней части корпуса буксы приемник вырабатывает цифровой сигнал, который усиливается приемной капсулой и передается по кабелю к устройствам постового оборудования. Сюда же поступает цифровой сигнал от датчика счета колес. Устройства постового оборудования автоматически распознают сигналы от перегретых букс и устанавливают номер проконтролированной оси или единицы подвижного состава. Далее сигналы от излучения и счета осей аварийных букс передаются по линии связи от постового оборудования к оборудованию станционному.

Браковочная температура буксового узла при одной и той же температуре подшипника зависит от температуры наружного воздуха. Она представляет собой разность между абсолютной температурой сканируемой поверхности корпуса буксы и температурой наружного воздуха.

В момент обнаружения перегретой буксы информация о наличии и расположении аварийной буксы в поезде с помощью специальной аппаратуры связи передается от постового оборудования к оборудованию станционному, где она регистрируется. Станционное оборудование обычно дополняется устройствами аварийной сигнализации (звуковой и речевой) и автоматическими указателями. В случае получения информации о перегретых буксах принимаются меры по остановке поезда.

Установки контроля КТСМ объединены в единую сеть автоматизированной системы контроля подвижного состава (АСК ПС), что позволяет осуществлять мониторинг нагрева букс по изменению местоположения и по времени.

Примечания (ГОСТ 16504)

Технический контроль – проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям.

Технический осмотр – контроль, осуществляемый, в основном, при помощи органов чувств и, в случае необходимости, средств контроля, номенклатура которых установлена соответствующей документацией.

Контроль визуальный – органолептический контроль, осуществляемый органами зрения.

Прибывающий на станцию состав поезда осмотрщики вагонов встречают сходу, что позволяет выявить возможные неисправности колесных пар, буксовых узлов и рессорных комплектов, а также обнаружить волоочащиеся детали. Например, внешними признаками ненормальной работы подшипникового узла являются скрежет, пощелкивание, искрение, задымление, появление запаха, движение колесной пары юзом и т. п.

После остановки поезда группы осмотрщиков приступают к проверке технического состояния состава одновременно с двух сторон по определенной схеме. При этом эффективно использование переносных диагностических приборов. Например, температуру нагрева верхней части корпуса буксы определяют с помощью бесконтактного измерителя температуры типа «Кельвин» или другого прибора. Признаком повышенного нагрева верхней части корпуса буксы или адаптера букс с коническими подшипниковыми узлами является температура нагрева более 60°С, без учета температуры окружающего воздуха.

Особенностью существующей системы организации технических осмотров является учет возможности необнаружения осмотрщиками неисправного вагона на какой-либо станции ввиду того, что неисправности по многим узлам неудобны для обнаружения, технический осмотр вагонов выполняется в сжатое время в трудных погодных условиях, ночью и в условиях глубоких психологических нагрузок.

Поэтому операция технического осмотра вагона многократно зарезервирована за счет наличия на сети дорог системы равномерно расположенных линейных предприятий (через каждые 250–350 км), на которых вагон, перемещающийся по сети, периодически подвергается техническому осмотру и контролю.

Поскольку осмотрщик какой-либо станции может не заметить с определенной вероятностью неисправный вагон, то поток неотбракованных неисправных вагонов, называемый «просеянным», поступает на следующую станцию, где подвергается такой же операции просеивания и т.д. [34].

Многократно проведенная операция просеивания позволяет с высокой вероятностью обеспечить выявление неисправностей вагонов.

Основные пути повышения эффективности системы обнаружения неисправностей вагонов следующие [4]:

- 1 Совершенствование существующей технологии контроля.

2 Разработка и внедрение переносных диагностических приборов и других технических средств обнаружения наиболее опасных повреждений.

3 Разработка тестовых методов и технологии проверки работоспособности наиболее проблемных узлов вагона (по аналогии с технологией опробования тормозного оборудования поезда на станции и т.п.).

4 Повышение контролепригодности вновь выпускаемых вагонов.

5 Внедрение автоматизированной технологии контроля технического состояния вагонов, что предполагает наличие:

- встроенных в конструкцию вагона датчиков, способных фиксировать момент перехода той или иной детали в предпредельное состояние;
- устройств автоматической передачи показаний этих датчиков в отраслевую компьютерную сеть во время движения поезда.

Неразрушающий контроль при изготовлении и ремонте деталей вагонов. На этапах изготовления и ремонта вагонов осуществляется контроль качества и технического состояния ответственных деталей с целью выявления их конструктивных, производственных и эксплуатационных дефектов, которые могут привести к возникновению отказов.

На вагоностроительных и вагоноремонтных предприятиях для выявления поверхностных и внутренних дефектов применяют дефектоскопический неразрушающий контроль.

П р и м е ч а н и я [ГОСТ 16504]

Неразрушающий контроль – технический контроль, при котором не нарушается пригодность объекта к применению.

Метод неразрушающего контроля – метод контроля, при котором не должна быть нарушена пригодность объекта к применению.

В зависимости от принципа работы различают следующие методы неразрушающего контроля: магнитные; ультразвуковые (акустические); радиационные; капиллярные; оптические (визуально-оптические); радиоволновые; тепловые; контроль течеиспусканием; электрические; электромагнитные или токовихревые [16].

Рассмотрим основные методы, используемые на вагоностроительных и вагоноремонтных предприятиях.

Методы магнитного контроля основаны на фиксации деформации магнитных полей в намагниченных деталях, в местах нарушения сплошности металла. К ним относятся *феррозондовый* и *магнитопорошковый*. В частности, при использовании магнитопорошкового метода силовые линии фиксируются с помощью магнитного порошка. Порошок будет удерживаться более интенсивно вдоль трещины ввиду того, что в зоне трещины металл намагничен сильнее. Этот метод позволяет выявлять дефекты в виде поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности (волосины,

трещины, расслоения и др.). Метод характеризуется простотой технологии, высокой производительностью и высокой чувствительностью.

Ультразвуковые методы основаны на способности ультразвуковых колебаний распространяться в металле на значительные расстояния в виде направленных пучков и почти полностью отражаться от поверхности дефектов – трещин, раковин, пор, газовых пузырей и др. Они используются для обнаружения поверхностных и внутренних дефектов (нарушений сплошности, неоднородности структуры и др.). При изготовлении и ремонте получили распространение следующие методы ультразвукового контроля: эхо-метод, теневой, зеркально-теневой, импульсный и резонансный.

Эхо-метод применяют для выявления несплошности материала, фиксируя отражаемые от дефекта ультразвуковые колебания (эхо-сигнал). Имеет наибольшее распространение и удобен возможностью одностороннего доступа к изделию.

Теневой метод, или метод «сквозного прозвучивания» характеризуется тем, что ультразвуковые волны вводятся с одной стороны и выводятся с другой. Применяется при двухстороннем доступе к детали.

Зеркально-теневой метод принципиально не отличается от теневого, но удобен тем, что предполагает односторонний доступ к детали. Данный метод используется, в частности, при контроле черновых осей на прозвучиваемость и чистовых осей на структурную неоднородность.

Импульсный метод характеризуется тем, что в контролируемое изделие излучается последовательность коротких ультразвуковых импульсов, называемых «зондирующими». Отражаемые от дефекта сигналы регистрируются. Для реализации метода необходим односторонний доступ к детали. Эхо-импульсный метод используют, например, при контроле внутренних дефектов осей (черновых и чистовых) при их изготовлении. Используется для выявления дефектов в поковках, трубах и др.

Резонансный метод применяется для проверки толщин листов и стенок труб (до 20 мм).

Радиационные методы контроля основаны на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения. Используется рентгеновское, γ -излучение и др. Проходя через толщу изделия, проникающие излучения по-разному ослабляются в дефектном и бездефектном сечениях и несут информацию о внутреннем строении вещества и наличии дефектов внутри изделия. Эти методы используются для контроля сварных швов, отливок, поволоков и др. В вагоностроении *рентген-контроль* подвергают в частности сварные швы котлов цистерн.

Капиллярные методы основаны на проникновении капель индикаторной жидкости, например керосина в полости поверхностных дефек-

тов, и задержании в них при удалении жидкости с поверхности.

Визуально-оптические методы основаны на взаимодействии светового излучения с контролируемым объектом. По характеру взаимодействия различают методы прошедшего, отраженного, рассеянного и индуцированного излучений. Оптические методы широко применяют для получения первичной информации о наличии наружных дефектов независимо от материала контролируемого объекта.

Электромагнитные методы основаны на регистрации изменений взаимодействия электромагнитного поля катушки с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых этой катушкой в контролируемом объекте. К ним относится *вихретоковый метод*. Используют для обнаружения поверхностных дефектов (нарушения сплошности) в деталях, изготовленных из электропроводных материалов, поскольку в них можно возбудить вихревые токи. Вихретоковый метод применяется для выявления дефектов в деталях тележек и автосцепного устройства.

Отметим в качестве примера, что при капитальном среднем и текущем ремонтах колесных пар их элементы и детали буксовых узлов подвергают неразрушающему контролю магнитопорошковым, вихретоковым и ультразвуковым методами.

1.4 Случайные величины и их характеристики

Случайные величины. В теории надежности приходится оперировать множеством случайных величин: наработка, или время работы объекта до отказа; время восстановления; число отказов, или число восстановлений за некоторый промежуток времени. Они могут быть дискретными (прерывными) и непрерывными.

Математическое описание случайных величин в теории надежности осуществляется методами теории вероятностей и математической статистики.

Универсальной исчерпывающей вероятностной характеристикой случайной величины является закон распределения, который может быть выражен в интегральной $F(t)$ и дифференциальной $f(t)$ формах.

Рассмотрим в качестве случайной величину τ – наработку объекта до отказа (время безотказной работы), которая наиболее часто применяется в теории надежности.

Интегральная функция распределения. Интегральная функция, или функция распределения $F(t)$ является универсальной формой выражения как дискретной, так и непрерывной случайной величины.

Интегральная функция распределения случайной величины τ будет иметь вид $F_{\tau}(t) = P(\tau \leq t)$ или $F(t) = P(\tau \leq t)$, где t – некоторая текущая переменная.

Событие ($\tau \leq t$) означает, что случайная величина τ – наработка до отказа – не превзойдет некоторого заданного значения t (заданной наработки), т. е. это событие означает отказ за наработку t .

Тогда функция $F(t)$ означает вероятность отказа за наработку t . Поэтому ее иногда называют функцией отказа.

Кривая, изображающая функцию $F(t)$, называется интегральной кривой распределения наработки до отказа (рисунок 1.2, а). Графическое изображение функции распределения $F(t)$ представляет собой некоторую убывающую кривую, значение которой начинается с 0 и доходит до единицы.

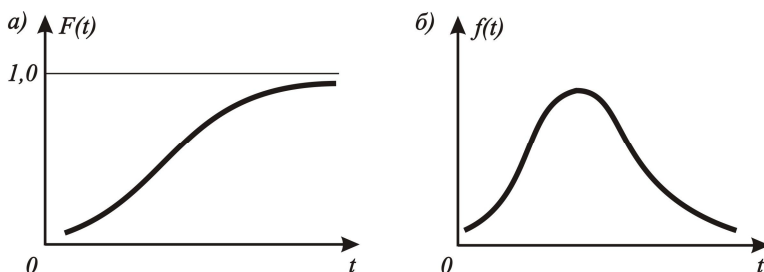


Рисунок 1.2 – Функции распределения:
а – интегральная; б – дифференциальная

Зная функцию $F(t)$, можно вычислить:

- вероятность отказа за наработку t_1 (вероятность того, что случайная величина примет значение $\leq t_1$):

$$F(t_1) = P(\tau \leq t_1);$$

- вероятность отказа на интервале наработки $[t_1, t_2]$ (вероятность попадания случайной величины на интервал $[t_1, t_2]$ или вероятность того, что случайная величина примет значение, лежащее в промежутке от t_1 до t_2):

$$F(t_2) - F(t_1) = P\{t_1 < \tau \leq t_2\};$$

- вероятность безотказной работы за наработку t_1 (вероятность того, что случайная величина примет значение $> t_1$):

$$1 - F(t_1) = P\{\tau > t_1\}.$$

Графическое представление вероятности попадания случайной величины на интервалы $[0, t_1]$, $[t_1, t_2]$ и $[t_1, \infty]$ показано на рисунке 1.3.

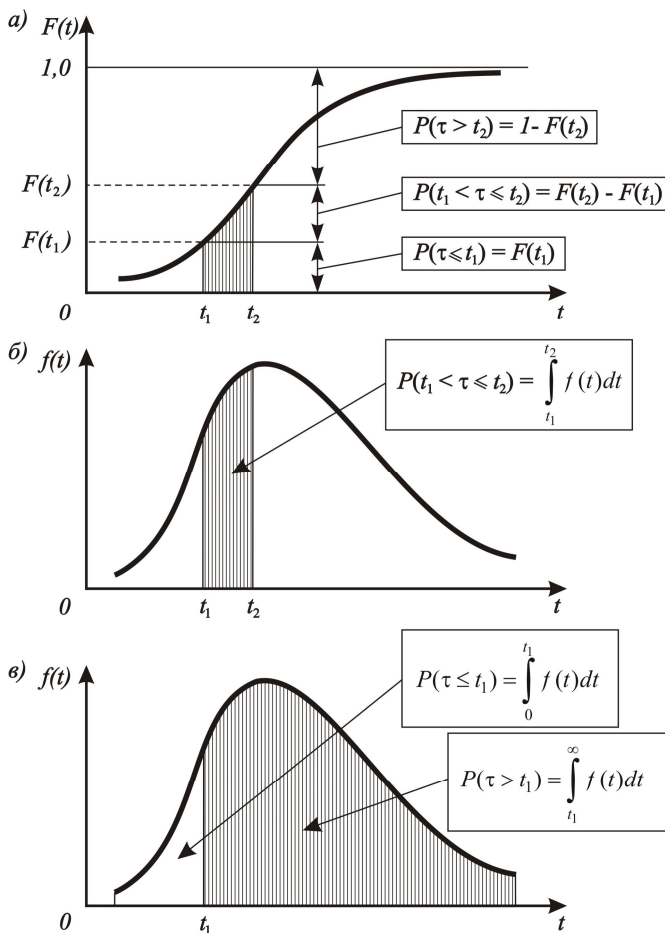


Рисунок 1.3 – Определение вероятности попадания случайной величины в заданный интервал с использованием функций:
 а – интегральной $F(t)$; б, в – дифференциальной $f(t)$

Дифференциальная функция распределения. Дифференциальная функция распределения, или плотность распределения $f(t)$ является формой выражения закона распределения непрерывной случайной величины. Дифференциальная функция характеризует как бы плотность, с которой распределяются значения случайной величины в данной точке. Поэтому ее

называют также плотностью распределения или плотностью вероятности случайной величины.

Функция $f(t)$ есть производная функции $F(t)$, т.е. $f(t) = F'(t) = dF(t)/dt$.

Отсюда, для определения вероятности отказа $F(t)$ необходимо проинтегрировать функцию плотности вероятности $f(t)$:

$$F(t) = P\{\tau \leq t\} = \int_0^t f(t)dt.$$

Кривая, изображающая функцию $f(t)$, называется *дифференциальной кривой распределения наработки до отказа*, или *кривой плотности вероятности отказов* (рисунок 1.2, б).

Зная функцию $f(t)$, можно вычислить:

- вероятность отказа за наработкуку t_1 (вероятность того, что случайная величина примет значение $\leq t_1$):

$$P\{\tau \leq t_1\} = \int_0^{t_1} f(t)dt;$$

- вероятность безотказной работы за наработкуку t_1 (вероятность того, что случайная величина примет значение $> t_1$):

$$P\{\tau > t_1\} = \int_{t_1}^{\infty} f(t)dt;$$

- вероятность отказа на интервале наработки $[t_1, t_2]$ (вероятность попадания случайной величины на интервал $[t_1, t_2]$):

$$P\{t_1 < \tau \leq t_2\} = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt.$$

Примечания

1 Геометрически вероятность попадания непрерывной случайной величины в заданный интервал $[t_1, t_2]$ равна площади под кривой функции $f(t)$ в интервале от t_1 до t_2 (см. рисунок 1.3, б).

2 Вероятность отказа за наработкуку t_1 равна площади под кривой функции $f(t)$ в интервале от 0 до t_1 . Эта площадь увеличивается с возрастанием наработки t_1 , а следовательно, увеличивается и вероятность отказа (см. рисунок 1.3, в).

3 Вероятность безотказной работы за наработку t_1 равна площади под кривой функции $f(t)$ в интервале от t_1 до ∞ . Эта вероятность уменьшается в соответствии с уменьшением площади под кривой $f(t)$ при увеличении t_1 (см. рисунок 1.3, в).

4 Общая площадь под кривой $f(t)$ всегда равна единице.

Числовые характеристики случайной величины. При решении практических задач теории надежности не всегда необходимо полное описание случайной величины в виде функции распределения. Зачастую достаточно знать ее основные числовые характеристики, выражающие наиболее существенные особенности распределения. Числовые параметры, выражающие в компактной форме наиболее существенные особенности случайной величины, называют *числовыми характеристиками случайной величины*.

К числовым характеристикам случайной величины относятся: математическое ожидание, мода, медиана, дисперсия, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Первые три величины характеризуют положение центров группирования случайной величины на числовой оси, остальные – рассеяние случайной величины.

Характеристики распределений используются в статистической трактовке для обработки результатов наблюдений (оценки состояния объекта) и в вероятностной трактовке для прогнозирования надежности.

М а т е м а т и ч е с к о е о ж и д а н и е (среднее значение):

- дискретной случайной величины –

$$M[\tau] = m_t = \sum t_i p_i ;$$

- непрерывной случайной величины –

$$M[\tau] = m_t = \int_0^{\infty} t f(t) d(t) ,$$

где p_i – вероятность появления наблюдаемого значения t_i случайной величины τ ;

$f(t)$ – функция плотности распределения случайной величины τ .

П р и м е ч а н и е – Как следует из приведенной выше формулы, величину математического ожидания для любого распределения можно получить, интегрируя произведение $tf(t)$ по всей области определения функции $f(t)$.

Статистическая оценка математического ожидания

$$\widehat{M}[\tau] = \widehat{m}_t = \sum \frac{t_i}{N},$$

где t_i – значение случайной величины τ – наработки до первого отказа i -го объекта;

N – общее число наблюдений t_i (общее число испытываемых объектов).

М о д а $t_{\text{МО}}$ – наиболее вероятное значение случайной величины, или иначе, то ее значение, при котором плотность вероятности максимальна.

М е д и а н а $t_{\text{ме}}$ – значение случайной величины, соответствующее вероятности 0,5, или квантиль, соответствующий вероятности 0,5. Площадь под графиком функции плотности $f(t)$ делится медианой пополам. *Квантиль распределения* – значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности.

Математическое ожидание, мода и медиана для дифференциальной функции показаны на рисунке 1.4.

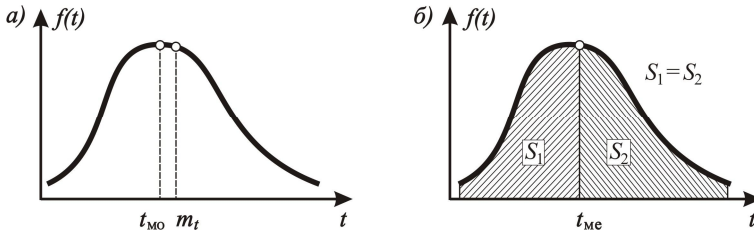


Рисунок 1.4 – Характеристики центров группирования случайной величины
а – мода и математическое ожидание; б – медиана

Д и с п е р с и я – математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания.

Дисперсия для дискретной случайной величины –

$$D[\tau] = D_t = M[(\tau - m_t)^2] = \sum (t_i - m_t)^2 p_i ;$$

для непрерывной –

$$D[\tau] = D_t = M[(\tau - m_t)^2] = \int_0^{\infty} (t - m_t)^2 f(t) d(t) .$$

Статистическая оценка дисперсии

$$\widehat{D}[\tau] = \widehat{D}_t = \frac{\sum (t_i - \widehat{m}_t)^2}{N-1}.$$

Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины, что не всегда удобно.

Среднее квадратическое отклонение случайной величины – корень квадратный из дисперсии и имеет размерность случайной величины

$$s = \sqrt{D[\tau]}.$$

Коэффициент вариации является относительным показателем рассеивания случайной величины и определяется как отношение среднего квадратического отклонения к математическому ожиданию:

$$v = \frac{s}{m_t}.$$

2 ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

К показателям надежности относят количественные характеристики надежности, которые используются для оценки реального уровня надежности объектов (вагонов и их составных частей).

П р и м е ч а н и е – Термин «объект» относится к конкретному объекту или к одному из представителей статистической выборки однотипных объектов.

Показатели надежности вагонов и их элементов определяют в результате испытания или наблюдения за группой однотипных объектов в условиях их нормальной эксплуатации.

Для показателей надежности приводятся две формы представления: вероятностная и статистическая. *Вероятностная* форма обычно бывает удобнее при априорных аналитических расчетах надежности на стадии проектирования и конструирования, *статистическая* – по статистическим данным об отказах при экспериментальном исследовании надежности технических объектов.

2.1 Показатели безотказности

Показатели безотказности вводятся либо по отношению ко всем возможным отказам объекта, либо по отношению к какому-либо одному типу отказа.

Безотказная работа конкретного объекта зависит от качества используемых материалов, достигнутого уровня технологии и степени стабильности технологического процесса, уровня технологической дисциплины, выполнения всех требований по применению объекта по назначению и др.

Ниже рассмотрим основные показатели безотказности, используемые для оценки надежности технических объектов.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет (ГОСТ 27.002–89).

П р и м е ч а н и е – Данный показатель представляет собой вероятность неоявления события (отказа) и используется для оценки вероятности безотказной работы до первого отказа и вводится для невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов.

Значение $P(t)$, как всякой вероятности может находиться в пределах от 0 до 1.
Вероятность безотказной работы объекта за наработку t

$$P(t) = P\{\tau > t\} = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt, \quad (2.1)$$

где $P\{ \}$ – вероятность события, заключенного в скобках;

τ – наработка (время работы) объекта от начального момента до возникновения отказа – случайная величина;

t – заданная наработка объекта (рассматриваемое время работы, заданный интервал времени);

$F(t)$ – интегральная функция – функция распределения наработки до отказа, или вероятность отказа объекта за наработку t ;

$f(t)$ – дифференциальная функция (плотность распределения наработки до отказа).

Статистическая оценка вероятности безотказной работы объекта за наработку t (по результатам испытаний)

$$\hat{P}(t) = \frac{N - n(t)}{N} = 1 - \frac{n(t)}{N}, \quad (2.2)$$

где N – число объектов, работоспособных в начале испытаний (в начальный момент времени);

$n(t)$ – число объектов, отказавших за наработку t .

Функцию $P(t)$, характеризующую основной показатель безотказности, называют еще *функцией надежности*.

Примечания

1 Формула (2.1) показывает связь вероятности безотказной работы $P(t)$ с функциями распределения $F(t)$ и $f(t)$.

2 Показатель $P(t)$ характеризует вероятность того, что наработка объекта до отказа τ окажется больше заданной наработки t .

3 Геометрически вероятность безотказной работы за наработку t численно равна площади под кривой функции $f(t)$ в интервале от t до ∞ (см. рисунок 2.1, а также рисунок 1.3, в, где $t = t_1$).

4 Точность статистической оценки $P(t)$ по формуле (2.2) увеличивается с ростом N . При большом числе объектов N статистическая оценка показателя практически совпадает с истинной вероятностью. Поэтому для получения достоверных оценок объем выборки N должен быть достаточно велик.

5 Формула (2.2) характеризует относительное число объектов, проработавших без отказа за интервал наработки t .

Наряду с понятием вероятности безотказной работы используется понятие «вероятность отказа», которая на практике иногда является более удобной характеристикой

Вероятность отказа $Q(t)$ – событие противоположное $P(t)$, или иначе вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$ образуют полную группу событий, поэтому $P(t) + Q(t) = 1$.

Вероятность отказа объекта за наработку t

$$Q(t) = F(t) = P\{\tau \leq t\} = 1 - P(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (2.3)$$

Статистическая оценка вероятности отказа объекта за наработку t (по результатам испытаний)

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}. \quad (2.4)$$

Примечания

1 Формула (2.3) показывает связь вероятности отказа $Q(t)$ с функциями $F(t)$, $f(t)$ и $P(t)$.

2 Геометрически вероятность отказа за наработку t численно равна площади под кривой функции $f(t)$ в интервале от 0 до t (см. рисунок 2.1, а также рисунок 1.3, в, где $t = t_1$).

3 Точность статистической оценки $Q(t)$ по формуле (2.4) увеличивается с ростом N .

4 Формула (2.4) характеризует относительное число объектов, потерявших работоспособность за интервал наработки t .

Функцию $Q(t) = F(t)$ называют еще *функцией отказа*.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$ являются функцией наработки t . Причем показатель $P(t)$ с ростом t должен уменьшаться, а $Q(t)$ – увеличиваться. Это следует из формул (2.1) и (2.3) и рисунка 2.1. Поэтому *применение $P(t)$ и $Q(t)$ без указания заданной наработки объекта t* (периода времени, в течение которого рассматривается работа объекта) *не имеет смысла*. На рисунке 2.2 приведен характерный график функции $P(t)$.

Как видно из рисунка 2.2, *кривая функции безотказной работы объекта $P(t)$* (функция надежности) *является убывающей в зависимости от наработки*. При $t = 0$ $P(t) = 1$, при $t = \infty$ $P(t) = 0$.

Пунктиром показана *кривая функции отказов $Q(t)$* , которая *симметрична по отношению к $P(t)$* . Обе кривые пересекаются в точке, соответствующей средней (медианной) наработке объекта $t = t_{me}$, при которой $P(t) = Q(t) = 0,5$.

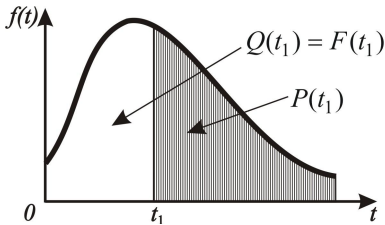


Рисунок 2.1 – К определению вероятности безотказной работы и вероятности отказа

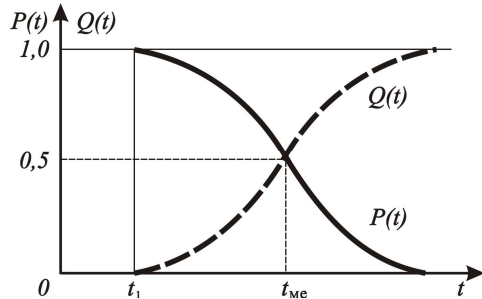


Рисунок 2.2 – Зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $Q(t)$ объекта от наработки t

Пример 2.1. Рассмотрим построение зависимостей функций безотказной работы $P(t)$ и отказа объекта $Q(t)$ от наработки на основе результатов испытания 10 одинаковых объектов.

Продолжительность испытания – до отказа всех 10 объектов.

Будем фиксировать число отказавших объектов в течение каждой тысячи километров пробега. Результаты испытания показаны на рисунке 2.3.

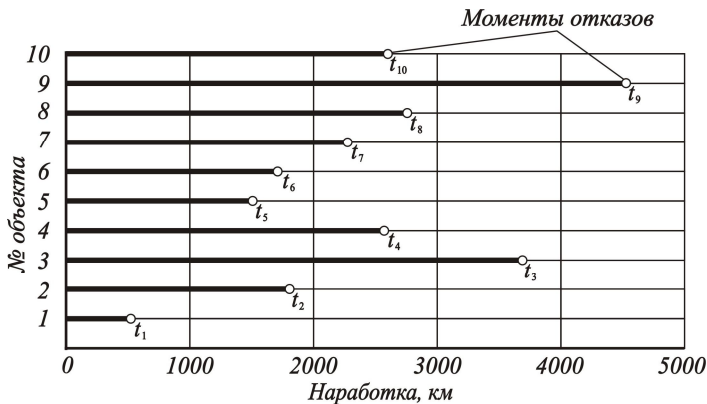


Рисунок 2.3 – Схема процесса испытаний 10 объектов

На рисунке t_i – наработка i -го объекта до первого отказа – достижения предельного (по условиям работоспособности) значения любым из его выходных параметров.

Решение. Статистические оценки $P(t)$ и $Q(t)$:

за наработку $t = 1000$ км –

$$n(1000) = 1, \quad \hat{P}(1000) = \frac{10-1}{10} = 0,9, \quad \hat{Q}(1000) = 1 - 0,9 = 0,1;$$

за наработку $t = 2000$ км –

$$n(2000) = 4, \quad \hat{P}(2000) = \frac{10-4}{10} = 0,6, \quad \hat{Q}(2000) = 1 - 0,6 = 0,4;$$

за наработку $t = 3000$ км –

$$n(3000) = 8, \quad \hat{P}(3000) = \frac{10-8}{10} = 0,2, \quad \hat{Q}(3000) = 1 - 0,2 = 0,8;$$

за наработку $t = 4000$ км –

$$n(4000) = 9, \quad \hat{P}(4000) = \frac{10-9}{10} = 0,1, \quad \hat{Q}(4000) = 1 - 0,1 = 0,9;$$

за наработку $t = 5000$ км –

$$n(5000) = 10, \quad \hat{P}(5000) = \frac{10-10}{10} = 0, \quad \hat{Q}(5000) = 1 - 0 = 0.$$

П р и м е ч а н и е – Если вероятность безотказной работы изделия за наработку $t = 1000$ км пробега равняется 0,90, то это означает, что из большого количества изделий данной модели в среднем 90 % изделий проработают без отказа не менее 1000 км (из 100 изделий – 90, из 1000 – 900 и т. д.).

В результате испытания нами получены эмпирические кривые $P(t)$ и $Q(t)$ (рисунок 2.4). Как уже отмечалось, для получения достоверных оценок $P(t)$ и $Q(t)$ необходимо увеличивать число наблюдаемых объектов N .

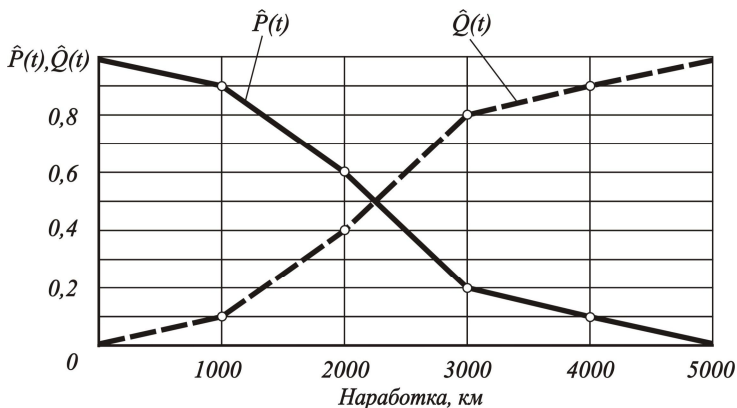


Рисунок 2.4 – Функции $\hat{P}(t)$ и $\hat{Q}(t)$, полученные по результатам испытаний

Как следует из графика, за интервал наработки рассматриваемых объектов $t = 1000$ км мы имеем весьма высокую безотказность работы, равную $\hat{P}(1000) = 0,9$. При $t = 2000$ км значение $\hat{P}(2000) = 0,6$, при $t = 3000$ км – $\hat{P}(3000) = 0,2$ и т.д.

Каждому объекту в зависимости от его работоспособности соответствует своя кривая $P(t)$ с большей или меньшей областью безотказной работы.

Примечание – Отметим, что, *выбирая значение заданной наработки t , можно для любого объекта обеспечить требуемое $P(t)$.*

Выбор допустимого значения $P(t)$. Допустимое значение $P(t)$ выбирается в зависимости от степени опасности отказа. Например, для ответственных изделий вагона (колесная пара, буксовый узел, тормозное оборудование и др.), отказ которых может привести к катастрофическим последствиям (авария, катастрофа, невыполнение ответственного задания), допустимые значения функции надежности доходят до $P(t) = 0,99$, а в авиационной технике – и до $P(t) = 0,9999$ и выше, т.е. практически равны единице.

Если последствия отказа связаны со значительным экономическим ущербом (повышенные простои в ремонте, работа на пониженных режимах, работы с ухудшенными параметрами), допустимое значение $P(t)$ может быть $\geq 0,9$. При отказах с незначительными экономическими потерями, допустимое значение $P(t)$ может быть значительно ниже.

Примечания

1 Допустимая вероятность безотказной работы численно характеризует опасность последствий отказа.

2 Последствия отказа определяют ответственность детали.

Неисправность колесной пары, например, часто влечет за собой отказ вагона в эксплуатации. В зависимости от причины отказа будут и разные последствия. Если это внезапный излом оси, то будет иметь место авария. Если превышение нормативного значения выходного показателя, например прокат колеса, более 9 мм или другая серьезная неисправность, то будут иметь место различные по величине экономические потери. Отсюда рекомендуемое допустимое значение $P(t)$ для оси колесной пары за наработку 10 лет должно быть не менее: 0,990 – для пассажирских вагонов, 0,989 – для почтовых, багажных и вагона-электростанции, 0,983 – для грузовых и изо-термических вагонов [24].

Достоинства показателя $P(t)$. Вероятность безотказной работы $P(t)$ наиболее полно определяет надежность вагонов и их узлов в силу того, что этот показатель:

- характеризует зависимость надежности изделия от времени и режима эксплуатации;
- достаточно просто получают расчетным путем и оценивают в процессе испытания;
- используется для расчета надежности сложных систем в процессе их проектирования.

В практической деятельности важно уметь определять вероятность появления события (возникновение или отсутствие отказа) на интервале Δt ,

примыкающем к интервалу t , на котором отказа объекта не произошло. Такую вероятность называют условной.

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа на интервале Δt , при условии, что объект проработал безотказно до начала этого интервала.

В этом случае используется *теорема умножения вероятностей*, согласно которой *вероятность произведения (совместного осуществления) событий A и B равна произведению вероятности $P(A)$ события A на условную вероятность $P_A(B)$ события B* . При этом вероятность $P_A(B)$ вычисляют в предположении, что событие A наступило.

Тогда, по теореме умножения вероятностей, *вероятность безотказной работы объекта за наработку $(t + \Delta t)$* (рисунок 2.5) –

$$P(t + \Delta t) = P(t) \cdot P_t(\Delta t), \quad (2.5)$$

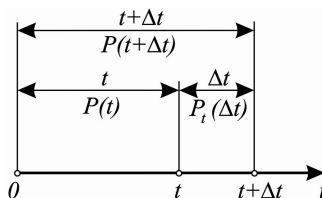
где $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта за наработку t ;

$P_t(\Delta t)$ – условная вероятность безотказной работы объекта за интервал наработки Δt .

Отсюда
$$P_t(\Delta t) = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)}, \quad (2.6)$$

т. е. *условная вероятность безотказной работы объекта в интервале наработки Δt равна отношению вероятностей безотказной работы в конце и в начале рассматриваемого интервала наработки Δt* .

Рисунок 2.5 – К определению условной вероятности события на интервале Δt



Условная вероятность отказа объекта в интервале наработки Δt –

$$Q_t(\Delta t) = 1 - P_t(\Delta t) = 1 - \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)} = \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{1 - F(t)}. \quad (2.7)$$

Гамма-процентная наработка до отказа t_γ – наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах (ГОСТ 27.002–89).

Примечания

1 Данный показатель вводится для неремонтируемых (невосстанавливаемых) и ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов.

2 При оценке показателя $P(t)$ решалась прямая задача – для заданной наработки t вычислялась вероятность безотказной работы. При оценке показателя t_γ решается обратная задача – определение наработки t , соответствующей заданной вероятности безотказной работы.

Гамма-процентную наработку до отказа t_γ определяют из уравнения

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma\%}{100} = P\{\tau > t_\gamma\} = \int_{t_\gamma}^{\infty} f(t) dt, \quad (2.8)$$

где $P(t_\gamma)$ – заданная вероятность безотказной работы;

$\{\tau > t_\gamma\}$ – событие, означающее, что случайная величина τ примет значение, большее t_γ , с заданной вероятностью γ ;

t_γ – искомое значение гамма-процентной наработки до отказа;

$f(t)$ – функция плотности распределения наработки до отказа.

Гамма-процентную наработку до отказа t_γ можно определять и по интегральной функции $F(t)$ (функции распределения наработки до отказа), как корень уравнения

$$F(t_\gamma) = P\{\tau \leq t_\gamma\} = 1 - P(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma\%}{100}. \quad (2.9)$$

Как следует из формулы (2.9), *гамма-процентное значение показателя представляет собой квантиль соответствующего распределения.*

Примечание – Статистические оценки для гамма-процентных показателей могут быть получены на основе статистических оценок либо непосредственно, либо после аппроксимации эмпирических функций подходящими аналитическими распределениями.

Если известен теоретический закон распределения наработки до отказа и его параметры, то величину гамма-процентной наработки t_γ рассчитывают по формулам:

- для нормального распределения –

$$t_\gamma = \mu - u_\gamma s; \quad (2.10)$$

- для экспоненциального распределения –

$$t_\gamma = \frac{1}{\lambda} (-\ln \gamma); \quad (2.11)$$

- для распределения Вейбулла –

$$t_\gamma = a(-\ln \lambda)^{1/b}, \quad (2.12)$$

где μ, s – параметры нормального распределения;

u_γ – квантиль нормированного нормального распределения, соответствующий вероятности γ и определяемый по таблице приложения В;

λ – параметр экспоненциального распределения;

a, b – параметры распределения Вейбулла.

Графическая схема определения гамма-процентного значения наработки до отказа с помощью кривых интегральной функции, функции надежности и дифференциальной функции показана на рисунке 2.6.

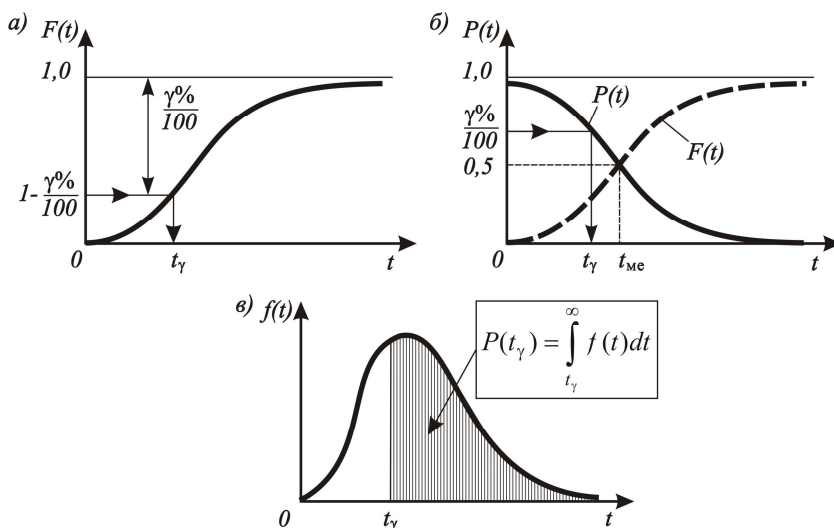


Рисунок 2.6 – Определение гамма-процентного значения случайной величины с использованием функций:

a – интегральной $F(t)$; $б$ – надежности $P(t)$, $в$ – дифференциальной $f(t)$

Как следует из приведенной схемы, для получения требуемого уровня безотказной работы объекта необходимо:

- задаться допустимым значением $P(t) = \gamma\%/100 = \gamma$, т. е. гамма-процентом объектов (в долях единицы), которые проработают без отказа за гамма-процентную наработку;

• определить наработку объекта $t = t_\gamma$, соответствующую данной регламентируемой вероятности безотказной работы.

П р и м е ч а н и е – Как следует из формул (2.10) – (2.12), гамма-процентная наработка до отказа представляет собой нижнюю доверительную границу рассеивания наработки до отказа при односторонней доверительной вероятности $\alpha_0 = \gamma = \gamma\% / 100$.

По значению гамма-процентной наработки до отказа судят о большей или меньшей безотказности объектов. Для показателей безотказности обычно задают значения 90; 95; 99; 99,5 % и т.д. Для критических отказов задаваемые значения γ должны быть весьма близки к 100 %, чтобы сделать критические отказы практически невозможными событиями.

П р и м е ч а н и е – *Гамма-процентные показатели* – это показатели, которым удовлетворяют не менее γ процентов изделий. Например, запись $t_{\gamma=0,95} = 1$ млн км пробега означает, что при наработке, равной 1 млн км пробега, вероятность безотказной работы составит 0,95. Или, иначе, – не менее 95 % вагонов будут иметь наработку до отказа более 1 млн км пробега.

По приведенным формулам определяют и другие гамма-процентные показатели: «гамма-процентный ресурс», «гамма-процентный срок службы», «гамма-процентное время восстановления», «гамма-процентный срок сохранности».

Статистические оценки для гамма-процентных показателей могут быть получены на основе статистических оценок параметров в случае, если закон распределения известен либо непосредственно после аппроксимации эмпирических функций подходящими теоретическими распределениями.

Средняя наработка до отказа T_1 – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа (ГОСТ 27.002–89).

П р и м е ч а н и е – Данный показатель вводится как для неремонтируемых (невосстанавливаемых), так и для ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов.

Вероятностная оценка средней наработки до отказа

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt, \quad (2.13)$$

где $f(t)$ – функция плотности распределения наработки до первого отказа,
 $f(t) = F'(t) = Q'(t)$;

$F(t)$ – функция распределения наработки до отказа.

Формула (2.13) позволяет вычислить математическое ожидание наработки объекта до отказа при известной функции плотности распределения $f(t)$, интегрированием произведения $[tf(t)]$ по всей области определения $f(t)$

(рисунок 2.7, а).

Среднюю наработку до отказа T_1 в общем случае можно получить также, используя функцию надежности $P(t)$:

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt . \quad (2.14)$$

Таким образом, величина T_1 численно равна площади под кривой функции надежности $P(t)$ в пределах от $t = 0$ до $t = \infty$ (рисунок 2.7, б).

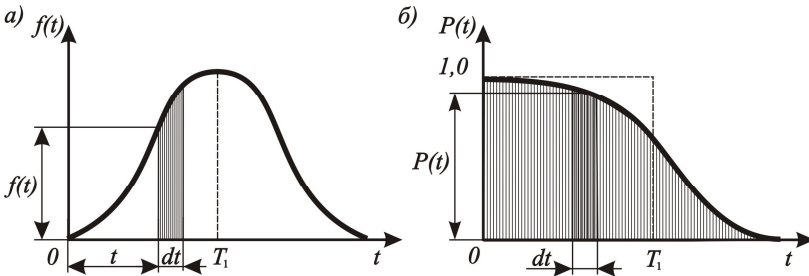


Рисунок 2.7 – К вероятностному определению средней наработки до отказа (математического ожидания наработки до отказа) с использованием функций: а – дифференциальной $f(t)$; б – надежности $P(t)$

З а м е ч а н и е – Приведем доказательство зависимости (2.14).

Как уже отмечалось, $f(t) = F'(t) = Q'(t)$ и $Q(t) = 1 - P(t)$. Производная функции $Q(t)$ – $Q'(t) = -P'(t)$. Тогда можно записать $f(t) = -P'(t)$. Подставив полученное выражение $f(t)$ в формулу (2.10), получим

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t P'(t) dt .$$

Выполним интегрирование по частям. Как известно, общая формула интегрирования по частям имеет вид $\int u dv = uv - \int v du$, где $u = t$, $dv = P'(t) dt$.

Отсюда $du = dt$, $v = \int P'(t) dt = P(t)$. Тогда

$$T_1 = -t P(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt .$$

Поскольку $P(0) = 1$, а $P(\infty) = 0$, то первое слагаемое в последнем выражении равно нулю. Следовательно,

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt .$$

Статистическая оценка средней наработки до отказа:

- для небольшого числа испытываемых объектов при наличии информации о моментах выхода из строя всех испытываемых объектов –

$$\hat{T}_1 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} ; \quad (2.15)$$

- для большого числа испытываемых объектов при наличии информации о количестве вышедших из строя объектов в каждом j -м интервале наработки –

$$\hat{T}_1 = \frac{\sum_{j=1}^k n_j \bar{t}_j}{N} , \quad (2.16)$$

где t_i – наработка i -го объекта до первого отказа;

k – число интервалов статистического ряда;

n_j – число объектов, отказавших в j -м интервале;

\bar{t}_j – среднее значение j -го интервала;

N – число работоспособных объектов в начале испытания (при $t = 0$).

Примечания

1 Использование формулы (2.15) предполагает наличие информации о моментах выхода из строя всех испытываемых объектов. Поэтому при большом числе объектов N пользоваться указанной формулой для вычисления T_1 неудобно. Имея данные о количестве вышедших из строя объектов в каждом интервале времени среднюю наработку до отказа лучше определять по формуле (2.16).

2 Нарботка до отказа, как правило, имеет значительный статистический разброс, обусловленный статистическим разбросом механических свойств материалов, элементов и соединений, а также изменчивостью (во времени и в пространстве) параметров, характеризующих внешние нагрузки и воздействия.

3 Формулы (2.15) и (2.16) соответствуют плану испытаний, при котором все объекты испытываются до отказа.

Пример 2.2. По результатам испытаний 10 объектов установлена наработка каждого из них до первого отказа: $t_1 = 760$ км, $t_2 = 1500$ км, $t_3 = 1300$ км, $t_4 = 2400$ км, $t_5 = 1400$ км, $t_6 = 3100$ км, $t_7 = 2400$ км, $t_8 = 2900$ км, $t_9 = 4400$ км, $t_{10} = 2400$ км.

Решение. Воспользовавшись формулой (2.12), получим

$$\hat{T}_1 = \frac{760 + 1500 + 1300 + 2400 \times 3 + 1400 + 3100 + 2900 + 4400}{10} = 2256 \text{ км.}$$

Пример 2.3. В процессе эксплуатации вагонов учитывалось число выходящих из строя одноименных объектов в течение каждой тысячи километров пробега. Наблюдение велось за 1000 однотипных объектов ($N = 1000$). В результате подсчета отказавших объектов получены данные, сведенные в таблицу 2.1.

Определить среднюю наработку до отказа рассматриваемых объектов.

Таблица 2.1 – Количество отказов объектов в j -м интервале наработки

| Интервал наработки Δt_j , км | Число отказов n_j | Интервал наработки Δt_j , км | Число отказов n_j |
|---|------------------------|---|------------------------|
| 0–1000 | 20 | 7000–8000 | 40 |
| 1000–2000 | 25 | 8000–9000 | 50 |
| 2000–3000 | 35 | 9000–10000 | 30 |
| 3000–4000 | 50 | 10000–11000 | 40 |
| 4000–5000 | 30 | 11000–12000 | 40 |
| 5000–6000 | 50 | 12000–13000 | 50 |
| 6000–7000 | 40 | 13000–14000 | 40 |

Решение. Для определения T_1 воспользуемся формулой (2.16):

$$\hat{T}_1 = \frac{20 \cdot 500 + 25 \cdot 1500 + 35 \cdot 2500 + \dots + 40 \cdot 13500}{1000} = 4035 \text{ км.}$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник (ГОСТ 27.002–89).

Примечание – Интенсивность отказов вводится для неремонтируемых (невосстанавливаемых) объектов.

Вероятностная оценка интенсивности отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (2.17)$$

где $f(t)$ – функция плотности распределения наработки до отказа;

$P(t)$ – функция надежности (вероятность безотказной работы).

Формула (2.17) показывает зависимости, связывающие интенсивность отказов $\lambda(t)$ с функциями $f(t)$, $P(t)$, а также $F(t)$.

Замечание – Приведем доказательство зависимости (2.17).

Условная вероятность отказа объекта в единицу наработки в интервале Δt будет равна $Q_t(\Delta t)/\Delta t$, где $Q_t(\Delta t)$ – условная вероятность отказа объекта в интервале наработки Δt (см. формулу (2.7)).

С учетом формулы (2.7)

$$\frac{Q_t(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t)\Delta t} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{[1 - F(t)]\Delta t}.$$

Интенсивность отказов получается в результате перехода в последнем уравнении к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned}\lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q_t(\Delta t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t)\Delta t} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{[1 - F(t)]\Delta t} = \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt} = \frac{f(t)}{P(t)}.\end{aligned}$$

Таким образом,

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt} = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

Как следует из формулы (2.17):

- *интенсивность отказов растет* по мере уменьшения вероятности безотказной работы, что имеет место *при увеличении интервала наработки* t ;
- при $P(t) \approx 1$ (для высоконадежных систем) интенсивность отказов приближенно равна функции плотности распределения наработки до отказа, т.е.

$$\lambda(t) = f(t)/1 = f(t).$$

Статистическая оценка интенсивности отказов

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}} \cdot \Delta t}, \quad (2.18)$$

где Δt – рассматриваемый интервал наработки, примыкающий к моменту t (рисунок 2.8);

$n(\Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале наработки Δt (от t до $t + \Delta t$);

$N_{\text{ср}}$ – среднее число объектов, исправно работающих в интервале Δt ,

$$N_{\text{ср}} = \frac{N_{\text{н}} + N_{\text{к}}}{2};$$

$N_{\text{н}}, N_{\text{к}}$ – число объектов, исправно работающих в начале и в конце интервала Δt , $N_{\text{к}} = N_{\text{н}} - n(\Delta t)$.

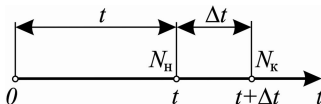


Рисунок 2.8 – К определению статистической оценки интенсивности отказов

Примечания

1 Как следует из формулы (2.18), *интенсивность отказов* – это отношение числа отказавших объектов в единицу наработки к среднему числу объектов, исправно рабо-

тающих в данном интервале наработки. Или иначе вероятность возникновения отказа в интервале наработки Δt , отнесенная к величине интервала наработки, т.е. плотность вероятности возникновения отказа.

2 *Физический смысл* плотности вероятности возникновения отказа – это *вероятность отказа в единицу наработки (скорость появления отказа объекта)*.

3 Интенсивность отказов выражается в единицах, обратных тем, в которых выражена наработка t . Например, если наработка в км, то интенсивность будет измеряться в 1/км, или км⁻¹ (числом отказов за 1 км пробега).

Пример 2.4. Рассмотрим схему испытаний 5 однотипных невосстанавливаемых объектов. Будем фиксировать число отказавших объектов в течение каждой тысячи километров пробега ($\Delta t = 1000$ км). Продолжительность испытания – до отказа всех 5 объектов.

Схема процесса испытаний представлена на рисунке 2.9. На схеме t_i – наработка i -го объекта до первого отказа.

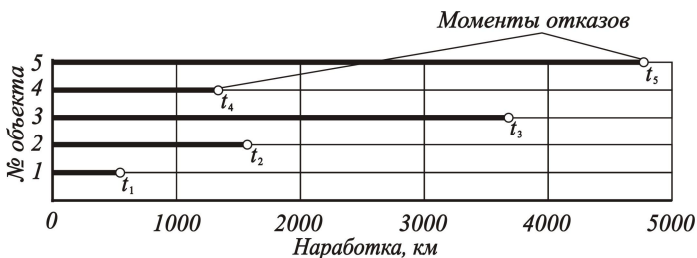


Рисунок 2.9 – Схема процесса испытаний 5 объектов

Определить интенсивность отказов объектов для интервала наработки $[1000, 2000]$.

Решение. Как следует из схемы испытаний, в интервале наработки $[1000, 2000]$ число отказавших объектов – $n(\Delta t) = 2$; число объектов, исправно работающих в начале и в конце интервала, – $N_H = 4$, $N_K = 2$.

Тогда:

- среднее число объектов, исправно работающих в рассматриваемом интервале, – $N_{cp} = (4 + 2)/2 = 3$;
- статистическая оценка интенсивности отказов в интервале наработки $[1000, 2000]$ –

$$\hat{\lambda}(1500) = \frac{2}{3 \cdot 1000} = 6,66 \cdot 10^{-4} \text{ 1/км.}$$

Примечание – Отметим, что значение $\hat{\lambda}(t)$ для удобства изложения приведено для середины интервала Δt_j . Это связано с тем, что интенсивность отказов является

ся постоянной в диапазоне интервала наработки Δt , а функция $\hat{\lambda}(t)$ – ступенчатой кривой или гистограммой.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ является функцией наработки t . Она зависит от того значения t , после которого оценивается λ . Поэтому применение $\lambda(t)$ без указания момента t не имеет смысла. Поясним это следующим графиком, на котором приведена типичная кривая изменения интенсивности отказов объектов во времени (рисунок 2.10).

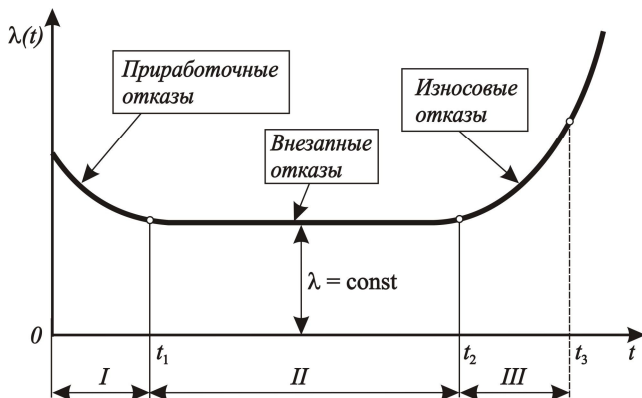


Рисунок 2.10 – Зависимость интенсивности отказов от наработки

Как видно из графика, существует три характерных периода функционирования изделия и соответствующие им характерные типы отказов:

I – период приработки (от 0 до t_1) – период приработочных отказов, когда в основном проявляются конструктивные, технологические и производственные дефекты и происходит их устранение («выжигание»);

II – период нормальной работы (от t_1 до t_2), для которой характерны только внезапные отказы постоянной интенсивности;

III – период интенсивного износа (от t_2 и далее) – период износостойких отказов (старение), которые протекают в необслуживаемых изделиях с возрастающей интенсивностью.

Как следует из графика, на участке I периода приработки кривая интенсивности вначале высокая, а затем резко снижается, на участке II , соответствующем периоду нормальной эксплуатации, не изменяет своей величины, а на участке III , называемом периодом износа, интенсивность отказов быстро возрастает и делает дальнейшую эксплуатацию изделия нерациональной, а иногда и опасной.

Величина интервала участка I может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от уровня организации отбраковки элементов на заводе-изготовителе, где элементы с внутренними дефектами своевременно изымаются из партии выпускаемой продукции. Величина интенсивности отказов на этом интервале во многом зависит от качества сборки, соблюдения требований монтажа и др. Период приработки может быть уменьшен и за счет конструктивных изменений, например, создания вагонных колес с профилем поверхности катания, соответствующем среднеизношенному очертанию.

На участке II функция интенсивности отказов $\lambda(t)$ становится постоянной при условии обеспечения нормальной эксплуатации, соблюдения установленного режима работы, своевременного и качественного выполнения технических обслуживаний и ремонтов.

По известной характеристике $\lambda(t)$ можно определить остальные количественные характеристики надежности:

- вероятность безотказной работы за наработку t –

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]; \quad (2.19)$$

- среднюю наработку до отказа –

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] dt; \quad (2.20)$$

- вероятность события, состоящего в том, что объект, проработавший безотказно до момента времени t , откажет за небольшой промежуток времени Δt , примыкающий к моменту t –

$$P\{t < \tau \leq t + \Delta t / (\tau > t)\} \approx \lambda(t) \cdot \Delta t. \quad (2.21)$$

Отметим, что выражение (2.19) является одним из основных уравнений теории надежности.

При $\lambda = \text{const}$ указанные количественные характеристики будут иметь вид:

- вероятность безотказной работы за наработку t – $P(t) = e^{-\lambda t}$; (2.22)

- средняя наработка до отказа – $T_1 = 1/\lambda$. (2.23)

З а м е ч а н и я – Приведем доказательство зависимостей (2.19), (2.22) и (2.23).
1 С учетом замечания к выводу уравнения (2.17) следует, что

$$\lambda(t) = - \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = - \frac{dP(t)}{P(t) dt}.$$

Тогда

$$-\lambda(t) dt = \frac{dP(t)}{P(t)}.$$

Произведем интегрирование этого выражения:

$$-\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)}; \quad -\int_0^t \lambda(t) dt = \ln P(t) \Big|_0^t = \ln P(t) - \ln P(0) = \ln P(t),$$

откуда

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

2 Уравнения (2.19) и (2.20) при $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ будут иметь вид

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

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp[-\lambda t] dt = -\frac{1}{\lambda} \exp(-\lambda t) \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}.$$

Достоинства показателя $\lambda(t)$. Интенсивность отказов как количественная характеристика обладает рядом достоинств:

1 Она, являясь функцией времени, позволяет наглядно установить характерные периоды работы объектов, что может быть использовано для повышения их надежности.

2 По известной характеристике $\lambda(t)$ достаточно просто определить:

- остальные количественные характеристики надежности;

- число отказавших объектов $n(\Delta t)$ в промежутке времени Δt и тем самым определить необходимое количество запасных частей, что весьма важно для обеспечения нормальной эксплуатации технических объектов:

$$n_{\text{зп}} \geq n(\Delta t) = \hat{\lambda}(t) \cdot N_{\text{ср}} \cdot \Delta t.$$

Средняя наработка на отказ (*наработка на отказ*) T – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки (ГОСТ 27.002–89).

Примечания

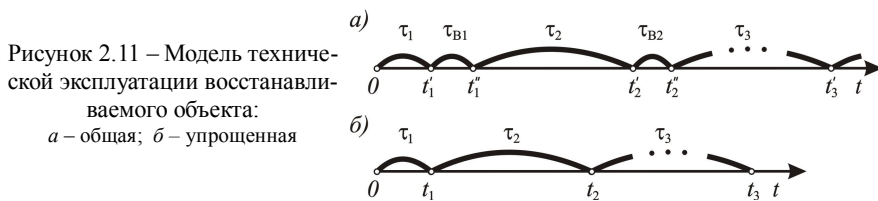
1 Как следует из определения, этот показатель введен применительно к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы.

2 Средняя наработка на отказ измеряется в единицах наработки.

Процесс эксплуатации восстанавливаемых объектов может быть представлен как последовательность интервалов работоспособности τ_i , чередующихся с интервалами восстановления τ_{Bi} (рисунок 2.11, а).

Обозначения на рисунке 2.11: $[t'_1, t'_2, t'_3, \dots]$ – моменты отказов на оси времени, образующие *поток отказов*; $[t''_1, t''_2, t''_3, \dots]$ – моменты восстановлений, образующие *поток восстановлений*.

В рамках допущений о пренебрежимо малой продолжительности ремонта и 100%-й восстанавливаемости элементов объекта покажем упрощенную модель его эксплуатации без учета времени восстановления (рисунок 2.11, б).



Примечания

1 В соответствии с приведенной моделью каждый объект может иметь несколько отказов. Отказы устраняются ремонтом или заменой. Последовательность таких отказов, происходящих в случайные моменты времени, называют потоком отказов.

2 Под восстановлением объекта понимается не только ремонт той или иной его части, но в ряде случаев – его замена или замена частей. Для пользователя совершенно неважно, восстанавливается работоспособность непосредственно ремонтом объекта или заменой его на полностью работоспособное.

Вероятностная оценка средней наработки на отказ

$$T = \frac{t}{M\{r(t)\}}, \tag{2.24}$$

где t – суммарная наработка;

$r(t)$ – число отказов, наступивших в течение суммарной наработки t ;

$M\{r(t)\}$ – математическое ожидание числа отказов, наступивших в течение суммарной наработки t .

Статистическая оценка средней наработки на отказ:

- для сравнительно небольшого числа испытываемых объектов –

$$\hat{T} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{t_{\text{сум}}}{n}; \tag{2.25}$$

- для большого числа испытываемых объектов –

$$\hat{T} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij}}{\sum_{j=1}^N n_j} = \frac{\sum_{j=1}^N t_j^{\text{сум}}}{\sum_{j=1}^N n_j^{\text{сум}}}, \quad (2.26)$$

где t_i – наработка (время исправной работы) объекта между $(i-1)$ -м и i -м отказами;

t_{ij} – наработка (время исправной работы) j -го образца объекта между $(i-1)$ -м и i -м отказами;

n_j – число отказов за наработку t j -го образца;

$t_{\text{сум}}$ – суммарная наработка объекта за период наблюдения;

n – число отказов за период наблюдения t ;

$t_j^{\text{сум}}$ – суммарная наработка j -го объекта за период наблюдения;

$n_j^{\text{сум}}$ – число отказов j -го объекта за период наблюдения.

Примечание – Таким образом, \hat{T} – отношение суммарной наработки за время наблюдения за объектом или группой однотипных объектов к наблюдаемому числу отказов за это же время.

Пример 2.5. За время наблюдения за работой одного объекта было зафиксировано 10 отказов, а суммарная наработка объекта составила 9,85 млн км пробега.

Определить среднюю наработку на отказ.

Решение. По формуле (2.25) находим

$$\hat{T} = \frac{9,85}{10} = 0,985 \text{ млн км пробега.}$$

Пример 2.6. В течение некоторого периода времени производилось наблюдение за работой трех однотипных объектов. За период наблюдения было зарегистрировано по первому объекту 6 отказов, по второму и третьему – 11 и 8 отказов соответственно. Суммарная наработка первого объекта составила 1,81, второго – 3,29 и третьего – 2,45 млн км пробега.

Требуется определить среднюю наработку на отказ.

Решение. Для определения \hat{T} воспользуемся формулой (2.26):

$$\hat{T} = \frac{1,81 + 3,29 + 2,45}{6 + 11 + 8} = 0,3 \text{ млн км пробега.}$$

Параметр потока отказов $\mu(t)$ – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки (ГОСТ 27.002–89). Или, по аналогии с

$\lambda(t)$, – плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени.

Примечание – Этот показатель введен применительно к восстанавливаемым объектам.

Вероятностная оценка параметра потока отказов

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{r(\Delta t)\}}{\Delta t}, \quad (2.27)$$

где Δt – рассматриваемый (малый) интервал наработки;

$r(\Delta t)$ – число отказов в интервале наработки Δt (от t до $t + \Delta t$);

$M\{r(\Delta t)\}$ – математическое ожидание числа отказов объекта за достаточно малую наработку Δt .

Статистическая оценка параметра потоков отказов

$$\hat{\mu}(t) = \frac{r(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (2.28)$$

где $r(\Delta t)$ – число отказов в интервале наработки Δt ;

N – число испытываемых объектов. Поскольку все отказавшие объекты заменяются исправными, то N – это первоначальное число испытываемых объектов.

Примечания

1 Согласно формуле (2.28) *параметр потока отказов* – это отношение числа отказов в единицу наработки к числу испытываемых объектов (при условии, что все вышедшие из строя объекты заменяются исправными (новыми или отремонтированными)).

2 По физическому смыслу *параметр потока отказов* представляет собой *скорость появления отказов* (среднее число отказов в единицу наработки).

Пример. 2.7. Рассмотрим схему испытаний 5 однотипных восстанавливаемых объектов ($N = 5$). Фиксируем число отказов объектов в течение каждой тысячи километров пробега. Отказавшие объекты заменяются исправными (новыми или отремонтированными).

Схема процесса испытаний приведена на рисунке 2.12.

Определить параметр потока отказов для интервала наработки [1000, 2000].

Решение. Как следует из схемы испытаний, число отказов объектов в интервале наработки [1000, 2000] – $r(\Delta t) = 2$.

Тогда, статистическая оценка параметра потока отказов в рассматриваемом интервале наработки –

$$\hat{\mu}(3500) = \frac{2}{5 \cdot 1000} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/км.}$$

Примечание – Обращаем внимание, что по аналогии с $\hat{\lambda}(t)$ значение $\hat{\mu}(t)$ приведено для середины интервала Δt_j .

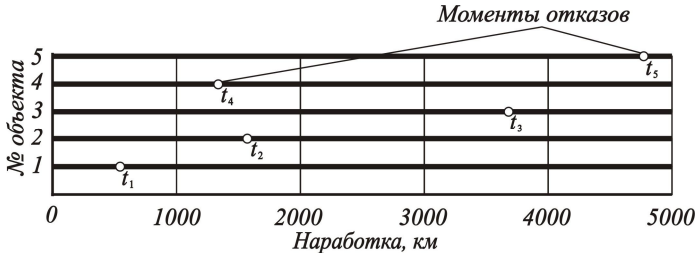


Рисунок 2.12 – Схема процесса испытаний 5 восстанавливаемых объектов

Как уже отмечалось, последовательность отказов объекта на протяжении испытания образуют *поток отказов*.

Существует множество *математических моделей потока отказов*. Наиболее часто при решении задач надежности используют простейший поток.

Простейший поток отказов удовлетворяет одновременно трем условиям: стационарности, ординарности, отсутствия последействия.

Поток внезапных отказов предполагают *стационарным*, т.е. среднее число отказов в единицу времени постоянно ($\mu(t) = \mu = \lambda = \text{const}$), *ординарным*, при котором одновременно возникает не более одного отказа, и *без последействия*, что означает взаимную независимость появления отказов в разные (непересекающиеся) промежутки времени.

Для стационарных потоков можно применять формулу

$$\hat{\mu}(t) = \frac{1}{\hat{T}}, \quad (2.29)$$

где \hat{T} – статистическая оценка средней наработки на отказ.

Используя формулу (2.28), можно определить среднее число отказов объектов в промежутки времени (в интервале наработки) Δt :

$$r(\Delta t) = \hat{\mu}(t) \cdot N \cdot \Delta t. \quad (2.30)$$

К недостаткам показателя $\mu(t)$ как характеристики надежности необходимо отнести сложность определения по известной функции $\mu(t)$ других

характеристик надежности, в частности, основной из них – вероятности безотказной работы.

Достоинства показателя $\mu(t)$. Показатель $\mu(t)$ позволяет:

- определить количество запасных частей (объектов), необходимое для обеспечения нормальной эксплуатации технических объектов в промежутке времени Δt , примыкающего к моменту t (см. формулу (2.30));
- спланировать частоту профилактических мероприятий, структуру ремонтных предприятий, необходимое количество и номенклатуру запасных частей.

В таблице 2.2 [23] приведены для справки параметры потока отказов основных типов грузовых вагонов. Данные в таблице 2.2 относятся к вагонам новой постройки до первого планового деповского ремонта.

Таблица 2.2 – Параметры потока отказов основных типов грузовых вагонов

| Тип и модель вагона | Параметр потока отказов вагона, μ_v | |
|---|---|----------------------|
| | 1/год | 1/10 ⁵ км |
| Полувагон 4-осный с люками и торцевыми дверями, модели 12-753, 12-757 | 0,51 | 0,56 |
| Полувагон 4-осный с люками и торцевыми стенами, модель 12-119 | 0,44 | 0,52 |
| Полувагон 4-осный с глухим кузовом, модель 12-1592 | 0,40 | 0,47 |
| Крытый 4-осный вагон, модель 11-270 | 0,51 | 0,68 |
| Платформа 4-осная универсальная, модель 13-4012 | 0,24 | 0,31 |
| Платформа 4-осная для контейнеров и колесной техники, модель 13-9004 | 0,32 | 0,40 |
| Цистерна 4-осная нефтебензиновая, модель 15-1424 | 0,39 | 0,40 |
| Цистерна 4-осная для серной кислоты, модель 15-1542 | 0,32 | 0,46 |
| Вагон-хоппер для цемента, модель 19-758 | 0,40 | 0,55 |
| Вагон-хоппер для зерна, модель 19-756 | 0,27 | 0,34 |

2.2 Показатели долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости

2.2.1 Показатели долговечности

Показатели долговечности оценивают потерю работоспособности объекта за весь период его эксплуатации. Они разделяются на гамма-процентные и средние. Рассмотрим основные из них.

Гамма-процентный ресурс T_{γ} – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах (ГОСТ 27.002–89).

Гамма-процентный ресурс является основным расчетным показателем долговечности многих деталей и, в частности, подшипников качения.

П р и м е ч а н и е – Отметим, что при $\gamma = 90\%$ ресурс называют «девяностопроцентным», который обеспечивает вероятность достижения предельного состояния до 0,9. Гамма-процентный ресурс при $\gamma = 50\%$ называют медианным.

Для изделий серийного и массового производства наиболее часто используют 90%-ный ресурс. Для весьма ответственных изделий γ -ресурс выбирают в размере 95 % и выше. Если отказ опасен для жизни людей, γ -ресурс приближают к 100 %.

Обычный критерий оценки эксплуатационных свойств подшипника качения – базовая долговечность при 90%-ной надежности. Однако в некоторых случаях использования подшипников желательнее рассчитывать долговечность при других уровнях надежности. Например, базовая долговечность группы идентичных вагонных подшипников качения (или отдельного подшипника), работающих в одинаковых условиях, – долговечность при 90%-ной надежности – представляет собой ресурс, измеряемый километрами пробега, в течение которого не менее 90 % из них проработают без появления признаков усталости металла. При этом характерным признаком усталости может явиться выкрашивание металла на рабочих поверхностях деталей.

Значения гамма-процентного ресурса T_{γ} определяют с использованием уравнений (2.8) – (2.12), заменив t_{γ} на T_{γ} .

Гамма-процентный ресурс – основной нормативный показатель долговечности, на основании которого допускают к эксплуатации изготовленные и отремонтированные объекты.

Гамма-процентный срок службы T_{γ} – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах (ГОСТ 27.002–89). Значения гамма-процентного срока службы T_{γ} определяют аналогично выражениям (2.8) – (2.12), заменив t_{γ} на T_{γ} .

При достижении гамма-процентного срока службы вагона дается заключение на предмет возможности его дальнейшего использования с определением необходимого объема работ по восстановлению ресурса вагона или исключению из эксплуатации. Например, значения гамма-процентного

(90%-ного) срока службы узлов грузового вагона следующие: вагон в целом и тележка – 32 года, поглощающий аппарат – 16 лет, колесо – 12 лет.

Средний ресурс T_p^{cp} – математическое ожидание ресурса (ГОСТ 27.002–89).

Вероятностную оценку среднего ресурса определяют по аналогии с формулами (2.13) и (2.14) для вычисления средней наработки до отказа.

Статистическая оценка среднего ресурса

$$\widehat{T}_p^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N}, \quad (2.31)$$

где T_{pi} – ресурс i -го объекта;

N – число рассматриваемых объектов.

Средний срок службы T_c^{cp} – математическое ожидание срока службы (ГОСТ 27.002–89).

Статистическую оценку среднего срока службы \widehat{T}_c^{cp} определяют по выражению, аналогичному (2.31).

Примечания

1 При использовании показателей долговечности следует указывать начало отсчета и вид действий после наступления предельного состояния (например, гамма-процентный ресурс от второго капитального ремонта до списания).

2 Показатели долговечности, отсчитываемые от ввода объекта в эксплуатацию до окончательного снятия с эксплуатации, называются гамма-процентным полным ресурсом (сроком службы), средним полным ресурсом (сроком службы).

2.2.2 Показатели ремонтпригодности и сохраняемости

Показатели ремонтпригодности характеризуют приспособленность объекта к предупреждению, обнаружению и устранению отказов, показатели сохраняемости – способность объекта сохранять выходные параметры объекта в заданных пределах в течение требуемого времени в конкретных условиях хранения.

Вероятность восстановления $R(t)$ – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение (ГОСТ 27.002–89). Его характеризуют:

вероятностная оценка –

$$R(t) = P\{\tau_g \leq t\} = F(t); \quad (2.32)$$

статистическая оценка –

$$\widehat{R}(t) = \frac{n_b(t)}{N}, \quad (2.33)$$

где $F(t)$ – функция распределения времени восстановления объектов;
 $n_b(t)$ – число объектов, восстановленных за период времени от 0 до t ;
 N – число наблюдаемых объектов.

Гамма-процентное время восстановления $T_{\text{в}\gamma}$ – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью γ , выраженной в процентах (ГОСТ 27.002–89). Значения гамма-процентного времени восстановления определяют по выражениям, аналогичным (2.8) – (2.12), заменив t_γ на $T_{\text{в}\gamma}$.

Среднее время восстановления $T_{\text{в}}$ – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа (ГОСТ 27.002–89).

Статистическая оценка среднего времени восстановления

$$\widehat{T}_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{\text{в}i}^{\text{сум}}}{n}, \quad (2.34)$$

где $\tau_{\text{в}i}^{\text{сум}}$ – суммарное время восстановления i -го объекта за рассматриваемый период эксплуатации;
 n – общее число отказов объектов за время испытания или определенный период эксплуатации.

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено (ГОСТ 27.002–89). Вероятностную и статистическую оценки интенсивности восстановления определяют по аналогии с формулами для вычисления интенсивности отказов.

Средняя трудоемкость восстановления – математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа (ГОСТ 27.002–89). Вероятностную и статистическую оценки средней трудоемкости восстановления определяют по аналогии с формулами для вычисления средней нагрузки до отказа.

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигнутый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах (ГОСТ 27.002–89). Значения гамма-процентного срока сохраняемости определяют по уравнениям, аналогичным (2.8) – (2.12).

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости (ГОСТ 27.002–89). Определяют по аналогии с формулами для вычисления средней наработки до отказа

2.3 Показатели готовности

Коэффициент готовности K_r – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается (ГОСТ 27.002–89).

П р и м е ч а н и е – Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению по назначению только в отношении его работоспособности в произвольный момент времени.

Различают стационарный и нестационарный коэффициенты готовности, а также средний коэффициент готовности.

Вероятностная оценка стационарного коэффициента готовности

$$K_r = \frac{T}{T + T_B}, \quad (2.35)$$

где T – средняя наработка на отказ (формула (2.24));

T_B – среднее время восстановления.

Статистическая оценка коэффициента готовности

$$K_r = \frac{t_p}{t_p + t_{\Pi}}, \quad (2.36)$$

где t_p – суммарное время эксплуатации объекта (вагона) в работоспособном состоянии за анализируемый период,

$$t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi};$$

t_{Π} – суммарная продолжительность вынужденного простоя вагона (нахождения вагона в ремонте) за этот же период,

$$t_{\Pi} = \sum_{i=1}^n t_{\Pi i};$$

$t_{pi}, t_{ш}$ – время работы объекта между $(i-1)$ -м и i -м отказами и время вынужденного простоя после i -го отказа соответственно;

n – число отказов (ремонтов) объекта.

Пример 2.8. Средняя наработка изделия на отказ составляет $T = 65$ недель, среднее время восстановления $T_B = 1,25$ недель. Определить коэффициент готовности.

Р е ш е н и е. Коэффициент готовности

$$K_r = \frac{T}{T + T_B} = \frac{65}{65 + 1,25} = 0,98.$$

Пример 2.9. Интенсивность отказов изделия $\lambda = 0,02$ 1/ч, а среднее время восстановления $T_B = 10$ ч. Требуется вычислить коэффициент готовности.

Р е ш е н и е. Учитывая, что $\lambda = \text{const}$, для определения средней наработки до первого отказа воспользуемся формулой (2.23): $T_1 = 1/\lambda = 1/0,02 = 50$ ч. Тогда коэффициент готовности

$$K_r = \frac{T_1}{T_1 + T_B} = \frac{50}{50 + 10} = 0,83.$$

Коэффициент оперативной готовности $K_{ор}$ – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени (ГОСТ 27.002–89).

П р и м е ч а н и е – Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа в течение заданного интервала времени.

Коэффициент оперативной готовности

$$K_{ор} = K_r P(t_0, t_1), \quad (2.37)$$

где K_r – коэффициент готовности;

$P(t_0, t_1)$ – вероятность безотказной работы объекта в интервале $[t_0, t_1]$;

t_0 – момент времени, с которого возникает необходимость применения объекта по назначению;

t_1 – момент времени, когда применение объекта по назначению прекращается.

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ – 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 (ГОСТ 27.002–89).

Примечание – Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации (ГОСТ Р 27.002–2009). Иначе, это вероятность того, что в данный произвольно взятый момент времени изделие работает, а не ремонтируется.

Коэффициент технического использования

$$K_{ти} = \frac{t_{раб}}{t_{раб} + t_{рем} + t_{пр}}, \quad (2.38)$$

где $t_{раб}$ – время работы изделия за некоторый период эксплуатации;

$t_{рем}$ – суммарная продолжительность ремонтов изделия за этот же период эксплуатации;

$t_{пр}$ – суммарная продолжительность простоя работоспособных вагонов в «резерве».

Коэффициент технического использования может служить показателем, определяющим долговечность изделия.

Коэффициент сохранения эффективности $K_{сэ}$ – 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 не возникают (ГОСТ 27.002–89).

Коэффициент сохранения эффективности характеризует степень влияния отказов на эффективность его применения по назначению. Для каждого конкретного типа объектов содержание понятия эффективности и точный смысл показателя (показателей) эффективности задаются техническим заданием и вводятся в нормативно-техническую и (или) конструкторскую (проектную) документацию.

2.4 Экономические показатели надежности

Основные показатели. Экономические показатели при оценке надежности весьма важны, так как повышение уровня надежности вагонов, с од-

ной стороны, связано с дополнительными материальными затратами, а с другой – с уменьшением затрат на их ремонт и обслуживание в эксплуатации.

Рассмотрим эти показатели.

Экономический показатель надежности

$$K_э = \frac{C_{изг} + C_{экс}}{T_{экс}} \rightarrow \min, \quad (2.39)$$

где $K_э$ – экономический показатель надежности, руб./ед. наработки, например, руб./год и т.д.;

$C_{изг}$ – стоимость изготовления нового вагона, руб.;

$C_{экс}$ – суммарные затраты на эксплуатацию, ремонт и обслуживание вагона, руб.;

$T_{экс}$ – период эксплуатации вагона, ед. наработки (год и др.).

П р и м е ч а н и е – Приведенный показатель представляет собой удельную (отнесенную к единице наработки) суммарную стоимость изготовления и эксплуатации вагона и является наиболее полным и общим оценочным показателем надежности вагона.

Таким образом, показателем надежности с экономической точки зрения может служить сумма затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией машины, отнесенная к длительности ее эксплуатации.

Следует стремиться к минимальному значению этого показателя за счет рационального распределения капиталовложений между сферой производства и сферой эксплуатации. При прочих равных условиях, чем дешевле изделие, тем больше затрат приходится на его эксплуатацию. Сэкономив на изготовлении, мы теряем в эксплуатации.

Соотношение между стоимостью изготовления и суммарными затратами на изготовление и эксплуатацию машины характеризуется коэффициентом издержек на изготовление.

Коэффициент, характеризующий затраты на изготовление

$$K_{изг} = \frac{C_{изг}}{C_{изг} + C_{экс}} < 1. \quad (2.40)$$

Он характеризует соотношение между стоимостью изготовления и суммарными затратами на изготовление и эксплуатацию машины.

Более высокая надежность достигается за счет дополнительных затрат. В связи с этим часто пользуются понятием цены надежности C_n .

Общие затраты на изготовление изделия

$$C_{\text{изг}} = C_{\text{п}} + C_{\text{н}}, \quad (2.41)$$

где $C_{\text{п}}$ – постоянные затраты, не зависящие от требований надежности;

$C_{\text{н}}$ – цена надежности или иначе переменная составляющая затрат, обусловленных требованиями надежности.

Как следует из формулы, общие затраты на изготовление изделия складываются из постоянных затрат $C_{\text{п}}$, не зависящих от требований надежности, и $C_{\text{н}}$ – переменной составляющей затрат, обусловленных требованиями надежности.

Для прогнозирования затрат на повышение надежности в ряде случаев применяют метод сравнения с прототипом на основании общих эмпирических зависимостей, полученных в результате обработки опытных данных о цене надежности. Во многих случаях зависимость для *цены надежности* имеет степенный характер.

Цену надежности можно установить, используя следующую зависимость:

$$C_{\text{н}} = C_{\text{но}} (T/T_0)^a, \quad (2.42)$$

где $C_{\text{но}}$ – цена надежности аналога или прототипа;

T – наработка на отказ проектируемого изделия;

T_0 – наработка на отказ (средний срок службы) прототипа;

a – эмпирический показатель, характеризующий уровень прогрессивности производства с точки зрения возможностей повышения надежности изделия. Обычно a находится в пределах 0,5–1,5.

Установление оптимального уровня надежности. При установлении оптимального, с экономических позиций, уровня надежности вагона следует иметь в виду, что *требования надежности двояким образом связаны с затратами на изготовление и эксплуатацию вагона*. При более высоких требованиях к надежности работы вагона необходимы увеличенные затраты на его изготовление $C_{\text{и}}$, но при этом значение затрат при эксплуатации $C_{\text{э}}$ снижаются.

На рисунке 2.13 показано изменение суммарных затрат, а также затрат на изготовление и эксплуатацию вагона в зависимости от вероятности безотказной работы $P(t)$, т.е. зависимости $C_{\text{сум}} = f\{P(t)\}$, а также $C_{\text{и}} = f\{P(t)\}$ и $C_{\text{э}} = f\{P(t)\}$.

Как видно из графика, *при увеличении требований надежности [увеличении $P(t)$] затраты на изготовление изделия $C_{\text{и}}$ возрастают, а эксплуа-*

тационные затраты C_3 снижаются. Оптимальный уровень надежности будет соответствовать минимальному значению суммарных затрат $C_{\text{сум}}^{\text{min}}$.

При большем влиянии безотказности на эксплуатационные затраты оптимальное значение $P(t)$ будет сдвигаться в сторону более высоких значений.

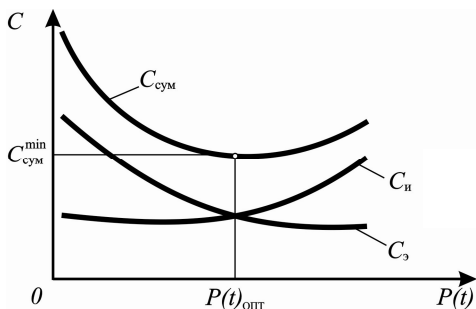


Рисунок 2.13 – Зависимость суммарных затрат от величины $P(t)$

На рисунке 2.13 $P(t)_{\text{опт}}$ – экономически оптимальный уровень надежности вагона, соответствующий минимальному значению суммарных затрат $C_{\text{сум}}^{\text{min}}$.

Во многих случаях с экономической точки зрения выгодно делать более надежное изделие даже в том случае, если к нему не предъявляются высокие требования безотказности по условиям эксплуатации.

3 ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Совокупность факторов, определяющих надежность вагона и его элементов, характеризуется случайными величинами. Соответственно сами показатели надежности являются также случайными величинами и определяются на основе методов теории вероятностей и математической статистики.

При *вероятностной оценке показателей надежности* используются законы распределения показателей надежности (наработки объекта до отказа, времени восстановления и др.). В теории надежности под случайной величиной, как правило, понимают наработку изделия до отказа.

Выбор и обоснование статистического закона распределения наработки объекта на отказ производится, прежде всего, на основе анализа физической природы отказов. На практике в качестве критерия выбора закона распределения используют также коэффициент вариации ν .

Рассмотрим некоторые типичные законы распределения наработки объекта на отказ, наиболее часто встречающиеся при оценке надежности вагонов. Особо следует выделить закон распределения Вейбулла, играющий в теории надежности такую же большую роль, как нормальный закон в математической статистике.

Как известно, все законы характеризуется дифференциальной $f(t)$ и интегральной $F(t)$ функциями.

3.1. Экспоненциальное распределение

Область применения закона. *Экспоненциальное распределение* используется в теории надежности чаще других как *статистическая модель для описания внезапных отказов*, появляющихся с постоянной интенсивностью $\lambda(t)$ в период нормальной эксплуатации объекта (см. рисунок 2.6).

Независимость интенсивности отказов от времени [$\lambda(t) = \lambda = \text{const}$] составляет главную особенность экспоненциального закона распределения.

Аналитические зависимости для функций $P(t)$, $F(t)$ и $f(t)$. При экспоненциальном законе распределения отказов имеют место следующие зависимости между основными количественными характеристиками надежности:

- *функция надежности (вероятность безотказной работы за наработку t)* –

$$P(t) = P\{\tau > t\} = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} = \exp(-\lambda t); \quad (3.1)$$

- *интегральная функция распределения наработки до отказа (вероятность отказа за наработку t)* –

$$F(t) = P\{\tau \leq t\} = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - \exp(-\lambda t); \quad (3.2)$$

- *дифференциальная функция распределения наработки до отказа (плотность вероятности отказов)* –

$$f(t) = \lambda P(t) = \lambda e^{-\lambda t} = \lambda \exp(-\lambda t), \quad (3.3)$$

где λ – параметр распределения (интенсивность отказов), $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$,
 $\lambda = 1/m_t$;

m_t – среднее значение (математическое ожидание) случайной величины τ ;

t – текущая переменная – наработка, для которой будут определяться показатели надежности.

Отсюда следует, что экспоненциальное распределение определяется одним параметром λ . Эта особенность экспоненциального распределения является его достоинством по сравнению с распределениями, зависящими от нескольких параметров.

П р и м е ч а н и е – Эти формулы справедливы для периода нормальной эксплуатации (см. рисунок 2.6), который характерен для объектов, уже прошедших приработку. То есть предполагается, что эксплуатация объектов начинается с наработки $t = t_1$ и не превышает период $[t_1, t_2]$. Длительность этого периода различна для различных объектов.

Графики функций $P(t)$, $F(t)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$ показаны на рисунке 3.1. Из графиков видно, что $P(t)$ и $f(t)$ уменьшаются с течением времени. Причем $P(t)$ уменьшается по экспоненциальному закону. Поэтому выражение $P(t) = e^{-\lambda t}$ часто называют экспоненциальным законом надежности.

П р и м е ч а н и е – функции $f(t)$, $F(t)$, $P(t)$ и $\lambda(t)$ являются полными характеристиками надежности изделия.

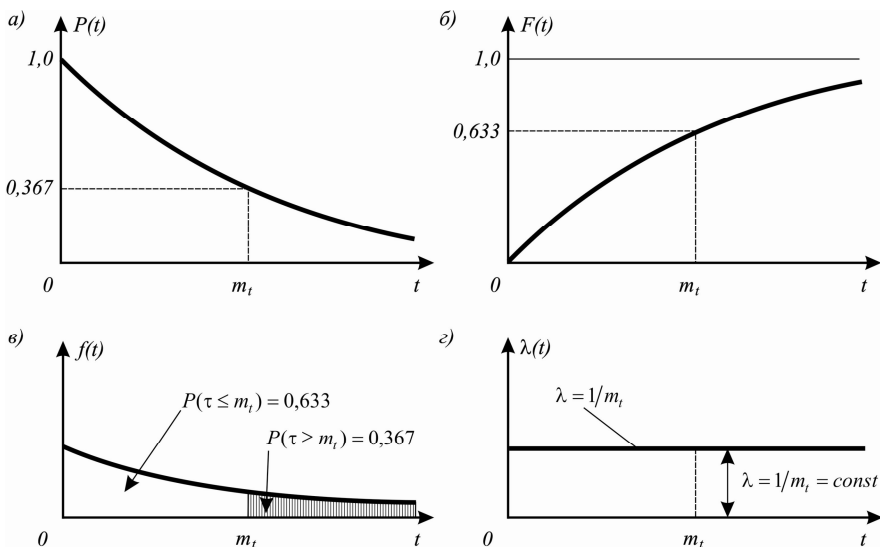


Рисунок 3.1 – Функции экспоненциального распределения:
 а – надежности $P(t)$; б – интегральной $F(t)$; в – дифференциальной $f(t)$;
 г – интенсивности отказов $\lambda(t)$

Характерным свойством экспоненциального распределения является то, что *вероятность безотказной работы на интервале Δt $P_t(\Delta t)$ не зависит от длительности t предшествующего интервала наработки, на котором отказа не произошло, а зависит только от длительности интервала наработки Δt .*

Условная вероятность безотказной работы объекта за интервал наработки Δt при заданной интенсивности отказов с учетом формул (2.5) и (3.1) будет равна

$$P_t(\Delta t) = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)} = \exp(-\lambda \Delta t), \quad (3.4)$$

где $P(t + \Delta t)$ – вероятность безотказной работы объекта за наработку $(t + \Delta t)$.

З а м е ч а н и е – Приведем вывод зависимости (3.4).

Вероятность безотказной работы объекта за интервал наработки $(0, t)$ по формуле (3.1) – $P(t) = \exp(-\lambda t)$;

вероятность безотказной работы объекта за интервал наработки $[0, t + \Delta t]$ –

$$P(t + \Delta t) = \exp[-\lambda(t + \Delta t)] = \exp(-\lambda t - \lambda \Delta t) = \exp(-\lambda t) \cdot \exp(-\lambda \Delta t);$$

условная вероятность безотказной работы объекта за интервал наработки Δt по формуле (2.6) с подстановкой выражений для функций $P(t)$ и $P(t + \Delta t)$ –

$$P_t(\Delta t) = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)} = \frac{\exp(-\lambda t) \cdot \exp(-\lambda \Delta t)}{\exp(-\lambda t)} = \exp(-\lambda \Delta t).$$

Полученная формула содержит только интервал наработки Δt . Отсюда длительность предшествующего интервала наработки $[0, t]$ не влияет на вероятность безотказной работы на последующем интервале Δt . Эта вероятность зависит только от длительности интервала Δt .

Таким образом, условная вероятность безотказной работы объекта $P_t(\Delta t)$ в интервале наработки Δt равна в данном случае безусловной вероятности $P(\Delta t) = \exp(-\lambda \Delta t)$.

Гамма-процентные показатели надежности [гамма-процентная наработка до отказа, гамма-процентный ресурс (срок службы)] при использовании экспоненциального распределения определяют по формуле (2.11).

Числовые характеристики случайной величины. *Средняя наработка до отказа* (математическое ожидание случайной величины τ) –

$$T_1 = m_t = \frac{1}{\lambda}, \quad (3.5)$$

т.е. среднее значение наработки до отказа m_t равно обратной величине интенсивности отказов λ . Этим свойством обладает только экспоненциальное распределение.

Поясним смысл среднего значения наработки до отказа m_t и использование этого показателя для первой предварительной оценки надежности объекта при экспоненциальном законе распределения. При $t = m_t = 1/\lambda$ вероятность безотказной работы будет иметь значение $P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-1} = 1/e = 0,367$. Из этого выражения следует, что при экспоненциальном законе надежности средняя наработка до отказа есть наработка, в течение которой вероятность безотказной работы уменьшается в e раз.

Значение функции надежности $P(t) = 0,367$ за наработку $t = m_t$ означает, что к моменту m_t из 100 однотипных объектов в среднем примерно 37 % проработают без отказа, а 63 % откажут.

Отсюда можно сделать важный вывод: при экспоненциальном распределении около 63 % отказов возникает к наработке $t = m_t$ и только 37 % отказов – позже. Поэтому надежную работу объектов можно обеспечить только для интервала наработки, значительно меньшего m_t .

Дисперсия случайной величины τ

$$D_t = \int_0^{\infty} (t - m_t)^2 f(t) dt = 1/\lambda^2 . \quad (3.6)$$

Среднее квадратическое отклонение случайной величины τ

$$s = \sqrt{D_t} = 1/\lambda . \quad (3.7)$$

Следовательно, при экспоненциальном законе распределения математическое ожидание наработки до отказа m_t численно равно среднему квадратическому отклонению s , т.е. $m_t = s = 1/\lambda$. Это свойство часто используется на практике для проверки истинности гипотезы о существовании экспоненциального закона надежности.

Оценка параметра λ по экспериментальным данным:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{m}_t} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i} , \quad (3.8)$$

где n – общее число отказов за время испытаний;

t_i – наработка до отказа i -го объекта;

\hat{m}_t – оценка математического ожидания по результатам испытаний,

$$\hat{m}_t = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} .$$

Таким образом, экспоненциальное распределение характеризуется следующими основными свойствами.

1 Распределение определяется одним параметром λ , который полностью характеризует надежность объекта.

2 Интенсивность возникновения отказов λ не зависит от интервала наработки t и является величиной постоянной, т.е. $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$.

3 Математическое ожидание наработки до отказа m_t численно равно среднему квадратическому отклонению s , т.е. $m_t = s = 1/\lambda$.

4 Вероятность безотказной работы объекта одинакова для одинаковых по величине интервалов наработки Δt в пределах периода нормальной эксплуатации и не зависит от длительности предшествующего периода $(0, t)$. Это означает, что надежность (вероятность безотказной работы) объекта, например, для первой тысячи километров пробега будет такой же, как и для последней тысячи километров.

Пример 3.1. Нарботка рассматриваемого узла вагона до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/км.

Требуется вычислить количественные характеристики надежности $f(t)$, $P(t)$, $F(t)$ и T_1 для $t = 1000$ км.

Решение.

1 Вычислим вероятность безотказной работы и вероятность отказа за наработку $t = 1000$ км, используя табличные значения функции e^{-x} (приложение Г):

$$P(1000) = \exp(-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000) = \exp(-0,025) = 0,9753 ;$$

$$F(1000) = 1 - 0,9753 = 0,0247 .$$

Примечание – Табличное значение $\exp(-0,025) = 0,9753$.

2 Определим плотность распределения (частоту отказов) $f(t)$:

$$f(1000) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9753 = 2,439 \cdot 10^{-5} \text{ 1/км.}$$

3. Вычислим среднюю наработку до первого отказа:

$$T_1 = m_t = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ км.}$$

3.2 Нормальное распределение

Область применения закона. *Нормальный закон распределения* является основным распределением математической статистики и *используется* в теории надежности как *статистическая модель для описания постепенных (износосовых) отказов*, когда коэффициент вариации v не превышает 0,3–0,4. Распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие примерно равные факторы.

Аналитические зависимости для функций $P(t)$, $F(t)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$:

- *дифференциальная функция нормального распределения* наработки до отказа (*плотность вероятности отказов*) –

$$f(t) = f(\mu, s) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2s^2}\right]; \quad (3.9)$$

• *интегральная функция распределения* наработки до отказа (*вероятность отказа за наработку t*) –

$$F(t) = F(\mu, s) = P\{\tau \leq t\} = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2s^2}\right] dt; \quad (3.10)$$

• *функция надежности* (*вероятность безотказной работы за наработку t*) –

$$P(t) = P\{\tau > t\} = 1 - F(t) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2s^2}\right] dt; \quad (3.11)$$

• *интенсивность отказов* –

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2s^2}\right]}{\int_t^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2s^2}\right] dt}, \quad (3.12)$$

где \exp – основание натуральных логарифмов, равное 2,71828;

t – текущая переменная – наработка, для которой будут определяться показатели надежности;

μ – математическое ожидание случайной величины τ ;

s – среднее квадратическое отклонение случайной величины τ .

s^2 – дисперсия случайной величины, $s^2 = D[\tau]$.

Примечания

1 Формулы справедливы для периода интенсивного износа (старения) (см. рисунок 2.6), который характеризуется ростом интенсивности отказов по сравнению с периодом нормальной эксплуатации. В этот период (t_2, ∞) в объектах происходят необратимые физико-химические явления, они стареют и соответственно возрастает интенсивность износа. При использовании нормального распределения предполагается, что эксплуатация объектов начинается с наработки $t = t_2$.

2 Отметим, что в формуле (3.10) для определения вероятности отказа $F(t)$ нижний предел интегрирования равен $-\infty$, что не имеет смысла при оценке надежности, т.к. объекты включаются в работу с момента $t = 0$, а не $t = -\infty$. Это неудобство преодоле-

вадается, если выразить $F(t)$ через $P(t)$. Тогда $P(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_t^{\infty} f(t)dt$, где нижний предел интегрирования равен t .

Графики функций $f(t)$, $F(t)$, $P(t)$ и $\lambda(t)$ нормального распределения показаны на рисунке 3.2.

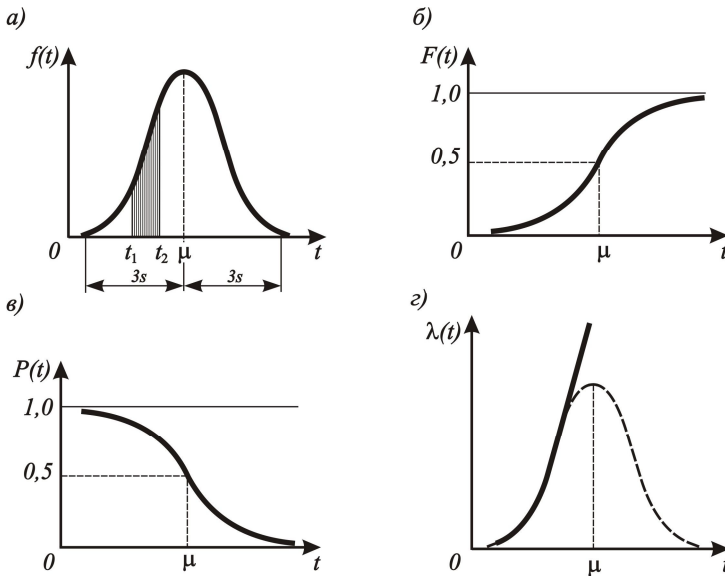


Рисунок 3.2 – Функции нормального распределения:
 а – дифференциальной $f(t)$; б – интегральной $F(t)$; в – надежности $P(t)$;
 г – интенсивности отказов $\lambda(t)$

Как следует из рисунка 3.2, а, кривая плотности вероятности нормального распределения $f(t)$ имеет симметричный колоколообразный вид (вид симметричной петли) с центром распределения в точке μ . Это означает, что в случае нормального распределения примерно половина отказов возникает до момента, соответствующего значению μ , и половина – после. Поскольку отказы группируются около среднего значения наработки объекта до отказа μ , то безотказную работу можно обеспечить для достаточно большого интервала наработки, близкого к значению μ .

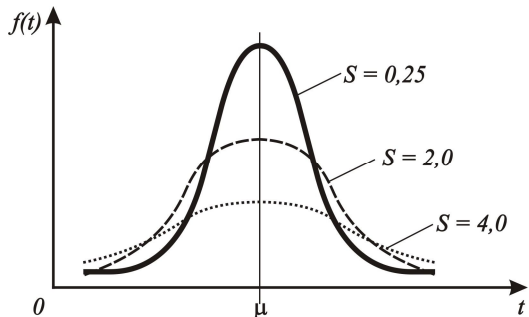
Анализ кривой интенсивности износов $\lambda(t)$ (см. рисунок 3.2, в) показывает, что интенсивность износовых отказов возрастает – сначала медленно, а после достижения наработки $t = \mu$ очень быстро, что характерно для периода износа.

Основные параметры и свойства нормального распределения. Величины μ и s принято называть параметрами нормального распределения, характеризующими соответственно центр распределения и его масштаб (см. рисунок 3.2, а).

Если изменять положение центра рассеивания μ , не изменяя характера рассеивания s , то кривая распределения будет смещаться вдоль оси наработки t .

Параметр s характеризует форму кривой распределения: чем больше рассеивание (больше s), тем меньше ордината кривой. Поскольку площадь под кривой распределения должна всегда оставаться равной 1, то увеличение s приводит к «растягиванию» кривой вдоль оси абсцисс s (рисунок 3.3).

Таким образом, *математическое ожидание определяет на графике положение пика, а среднее квадратическое отклонение (СКО) – ширину пика.* Кривая плотности распределения тем острее и выше, чем меньше s .



Основные свойства дифференциальной функции нормального распределения (рисунок 3.4):

- 1) функция определена на всей оси t от $-\infty$ до $+\infty$;
- 2) функция неотрицательна, и график ее расположен над осью t ;
- 3) график функции симметричен относительно вертикальной прямой $t = \mu$;
- 4) функция имеет максимум при $t = \mu$, равный $f_{\max}(t) = f(\mu) = 1/s\sqrt{2\pi}$;
- 5) график функции имеет точки перегиба – точки перехода от выпуклости к вогнутости $-(\mu - s)$ и $(\mu + s)$;
- 6) зона рассеивания нормально распределенной случайной величины

лежит в пределах $\mu \pm 3s$, т. е. в пределах $6s$ (*правило трех среднеквадратических отклонений*). Иначе, абсолютная величина отклонения нормально распределенной случайной величины от математического ожидания μ не должна превосходить утроенного среднеквадратического отклонения.

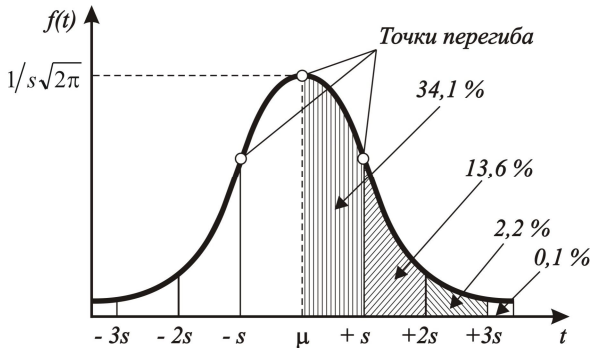


Рисунок 3.4 – К основным свойствам дифференциальной функции нормального распределения

Правило трех СКО состоит в том, что если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного СКО. Вероятность того, что абсолютная величина отклонения превысит утроенное СКО, равна $0,002 = 0,2\%$, т.е. почти все рассеивание нормально распределенной случайной величины укладывается на интервале $\mu \pm 3s$ (с точностью до долей процента).

Правило трех СКО позволяет ориентировочно определить интервал практически возможных значений случайной величины по известному математическому ожиданию и СКО или СКО случайной величины по максимальному практически возможному отклонению от среднего значения.

В интервалах $\mu \pm s$, $\mu \pm 2s$ и $\mu \pm 3s$ расположено соответственно примерно 68,2; 95,4 и 99,8 % площади под кривой нормального распределения. Это означает, что шансы на то, что выбранная случайным образом нормально распределенная случайная величина окажется в интервале $\mu \pm 3s$, составляет 998 к 1000.

В целом, сравнивая изделия с одинаковой средней наработкой до отказа μ и разным средним квадратическим отклонением s , можно утверждать, что чем меньше s , тем изделие лучше.

Расчет вероятностей отказа и безотказной работы на интервале Δt . Вероятность отказа в интервале наработки $[t_1, t_2]$

$$F(t_1, t_2) = P\{t_1 < \tau \leq t_2\} = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2s^2}\right] dt. \quad (3.13)$$

Геометрически эта вероятность равна площади под кривой функции $f(t)$ в интервале от t_1 до t_2 (см. рисунок 3.2, а).

Отметим, что при расчете по формуле (3.13) необходимо учитывать следующую особенность.

Так, вероятность отказа объекта будет одинакова и равна 2,2 % для одинаковых по величине интервалов наработки $[\mu - 3s, \mu - 2s]$ и $[\mu + 2s, \mu + 3s]$, расположенных соответственно в начале и в конце распределения (см. рисунок 3.4). Однако эти вероятности не равнозначны с точки зрения надежности. Действительно, вероятность отказа к началу первого интервала ($t = \mu - 3s$) будет 0,001 = 0,1 %, к началу второго интервала ($t = \mu + 2s$) – 0,977 = 97,7 %. Соответственно, вероятность безотказной работы равна 0,999 = 99,9 % и 0,023 = 2,3 %.

Полная вероятность отказа за интервал наработки $[0, t + \Delta t]$ будет равна сумме вероятностей отказа объекта за интервал наработки $[0, t]$ и интервал Δt , примыкающий к моменту t . Тогда полная вероятность отказа за интервал наработки $[0, \mu - 2s]$ составит $0,1 + 2,2 = 2,3$ %, а за интервал наработки $[0, \mu + 3s]$ – $97,7 + 2,2 = 99,9$ %. Соответственно вероятность безотказной работы будет равна 97,7 % ($100 - 2,3$) и 0,1 % ($100 - 99,9$). Отсюда, практически нереально, что объект проработает до начала второго интервала.

Для точной оценки вероятностей отказа и безотказной работы за интервал наработки нужно воспользоваться функциями $F(t)$ и $P(t)$.

Условная вероятность безотказной работы объекта в интервале наработки Δt $P_t(\Delta t)$ при условии, что объект проработал безотказно до начала этого интервала, определяется по формуле (2.6) как отношение вероятностей безотказной работы в конце и в начале рассматриваемого интервала наработки Δt . Так, для интервала наработки $[\mu - 3s, \mu - 2s]$ $t = \mu - 3s$, $t + \Delta t = \mu - 2s$, $\Delta t = s$. Тогда, $P(t) = 0,999$, $P(t + \Delta t) = 0,977$ и $P_t(\Delta t) = 0,977/0,999 = 0,978$.

Для интервала наработки $[\mu + 2s, \mu + 3s]$ $t = \mu + 2s$, $t + \Delta t = \mu + 3s$, $\Delta t = s$, $P(t) = 0,023$, $P(t + \Delta t) = 0,001$ и $P_t(\Delta t) = 0,001/0,023 = 0,043$. Соответственно, условная вероятность отказа на интервале наработки

$[\mu - 3s, \mu - 2s] - Q_t(\Delta t) = 1 - 0,978 = 0,022$, на интервале $[\mu + 2s, \mu + 3s] - Q_t(\Delta t) = 1 - 0,043 = 0,957$.

Вычисление функций $f(t)$, $F(t)$ и $P(t)$ в практических инженерных расчетах. В практических расчетах для вычисления функций $f(t)$, $F(t)$ и $P(t)$ пользуются табулированными значениями нормированных функций с $\mu = 0$ и $s = 1$.

Примечание – Поясним целесообразность перехода к нормированным функциям нормального распределения. Как следует из формулы (3.10), функция $F(t)$ определяется интегрированием дифференциальной функции $f(t)$. При этом подынтегральную функцию нельзя выразить через элементарные функции, т.е. вычислить прямо, а только при помощи разложения в ряд.

Указанное неудобство легко преодолевается, если вычислять интеграл через нормированную нормальную функцию, значения которой табулированы. Это позволяет вычисление интегралов заменить использованием таблиц.

Нормальное распределение с произвольными параметрами (μ, s) приводится к нормированному нормальному закону с параметрами $\mu = 0$ и $s = 1$ с помощью линейного преобразования

$$\left(\frac{t - \mu}{s}\right) = x. \quad (3.14)$$

Тогда, дифференциальная $\varphi(x)$ и интегральная $F_0(x)$ нормированные функции будут иметь вид

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right); \quad (3.15)$$

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (3.16)$$

где $x = (t - \mu)/s$ – нормированная нормально распределенная случайная величина.

Поскольку функции (3.15) и (3.16) имеют одну переменную x , то они могут быть однозначно заданы таблицей.

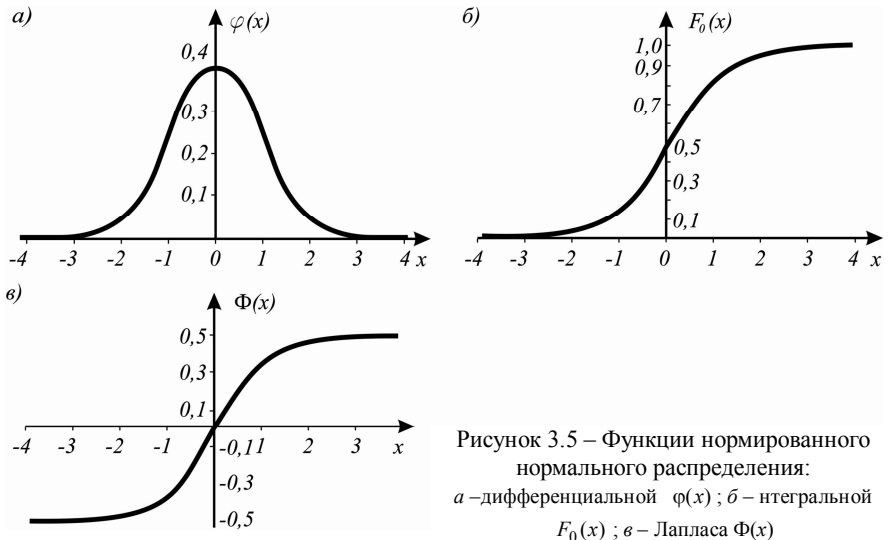
Примечания

1 *Нормированное нормальное распределение* – это нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и единичным средним квадратическим отклонением.

2 Переменная x является центрированной, так как $\mu = 0$, и нормированной, так как $s = 1$. При этом x называют также *квантилью* нормированного нормального распределения и обозначают обычно как u_p .

3 Табулирование функции – это вычисление значений функции при изменении аргумента от некоторого начального значения до некоторого конечного значения с определенным шагом.

Функции (3.15) и (3.16) представляют собой не что иное, как дифференциальную и интегральную функции нормально распределенной случайной величины с параметрами $\mu = 0, s = 1$ (рисунок 3.5). Значения этих функций табулированы и приведены соответственно в таблицах приложений Б и А.



Из уравнения (3.16) следует, что $F_0(-x) + F_0(x) = 1$. Отсюда вытекает правило знаков

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x). \quad (3.17)$$

Исходя из симметричности графика функции $\varphi(x)$ нормированного распределения относительно начала координат $\varphi(-x) = \varphi(x)$.

Из приведенных правил знаков следует, что достаточно иметь таблицы только положительных значений аргумента x для функций $\varphi(x)$ и $F_0(x)$.

Примечание – Проведенная замена переменной равноценна изменению масштаба в s раз и смещению функции $f(t)$ вдоль оси абсцисс на величину μ таким образом, что ось симметрии графика становится осью ординат.

Функции $f(t)$, $F(t)$, $P(t)$ связаны с функциями $\varphi(x)$, $F_0(x)$ следующими соотношениями:

$$f(t) = (1/s) \varphi(x) = (1/s) \varphi\left(\frac{t-\mu}{s}\right); \quad (3.18)$$

$$F(t) = F_0(x) = F_0\left(\frac{t-\mu}{s}\right), \quad (3.19)$$

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - F_0(x) = 1 - F_0\left(\frac{t-\mu}{s}\right). \quad (3.20)$$

Тогда вероятность отказа в интервале наработки $[t_1, t_2]$, выраженная через функцию $F_0(x)$,

$$\begin{aligned} F(t_1, t_2) &= \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = F(t_2) - F(t_1) = F_0(x_2) - F_0(x_1) = \\ &= F_0\left(\frac{t_2 - \mu}{s}\right) - F_0\left(\frac{t_1 - \mu}{s}\right). \end{aligned} \quad (3.21)$$

Таким образом, соотношения (3.18) – (3.21) позволяют по табличному значению $x = (t - \mu)/s$ определять значения функций $f(t)$, $F(t)$, $P(t)$ и $F(t_1, t_2)$.

П р и м е ч а н и е – Табличный интеграл $F_0(x)$ соответствует площади под кривой $\varphi(x)$ в интервале $[-\infty, x]$ и определяет вероятность того, что значение случайной величины будет находиться в пределах от $-\infty$ до x . В частности, для $t = 3s$ и соответственно $x = 3$ табличное значение интеграла $F_0(3) = 0,999$. Это означает, что случайная величина с вероятностью 0,999 не превысит значение $t = 3s$. Отсюда следует, что вероятность $P\{(t - \mu)/s \geq 3\} = P\{t \geq \mu + 3s\} = 0,001$, т.е. вероятность превысить значение $t = 3s$ составляет 0,1%.

Пользуясь соотношением (3.21) и таблицей $F_0(x)$, можно определить вероятность попадания нормально распределенной величины в интервалы $(\mu - s, \mu + s)$, $(\mu - 2s, \mu + 2s)$ и $(\mu - 3s, \mu + 3s)$. Например, для интервала $(t_1 = \mu - s, t_2 = \mu + s)$, где $x_1 = (t_1 - \mu)/s = -1$ и $x_2 = (t_2 - \mu)/s = 1$, значения табличных интегралов $F_0(1) = 0,841$, $F_0(-1) = 1 - 0,841 = 0,159$ и, следовательно, $F(t_1, t_2) = 0,841 - 0,159 = 0,682$.

Гамма-процентные показатели [гамма-процентная наработка до отказа, гамма-процентный ресурс (срок службы)] могут быть легко определены по формуле (2.10), используя значения квантилей u_γ нормированного нормального распределения.

З а м е ч а н и е – Поясним формулу (2.10).

В соответствии с уравнением (3.19)

$$F(t_p) = F_0\left(\frac{t_p - \mu}{s}\right) = F_0(u_p) = p,$$

где p – заданная вероятность, $p = 1 - \gamma$;

u_p – квантиль нормального распределения с параметрами $\mu = 0$ и $s = 1$.

Значение u_p , соответствующее заданной вероятности p , находится как корень уравнения $F_0(u_p) = p$. Значения u_p табулированы в зависимости от p .

Теперь необходимо от квантиля u_p перейти к квантилю t_p . Из $u_p = (t_p - \mu)/s$ следует, что $t_p = \mu + u_p s$. В таблице квантилей нормированного нормального распределения приводятся только положительные значения u_p , а при переходе к отрицательным значениям используется правило знаков $u_{1-p} = -u_p$. Это хорошо иллюстрируется рисунком 3.5, б.

Из рисунка 3.5, б следует, что интересующий нас интервал значений p (от 0 до 0,5), соответствующий вероятности безотказной работы $P(t)$ от 0,5 до 1,0, находится в зоне отрицательных значений $x = u_p$. Отсюда с учетом знака u_p и того, что $p = (1 - \gamma)$ можно записать $t_{1-\gamma} = \mu - u_{1-\gamma} s$.

Более удобно пользоваться обратной функцией – функцией надежности $P_0(u_p) = 1 - F_0(u_p)$, где $p = \gamma$.

С учетом изложенного $t_{1-\gamma} = \mu - u_{1-\gamma} s$ – при использовании функции $F_0(x)$; $t_\gamma = \mu - u_\gamma s$ – при использовании функции $P_0(x)$, причем значения $t_{1-\gamma}$ и t_γ , определяемые по приведенным выше формулам для функций $F_0(x)$ и $P_0(x)$, будут равны.

Значения квантилей u_γ даются в таблице приложения В в зависимости от требуемой вероятности безотказной работы $P(t) = \gamma$.

В практических расчетах надежности наряду с интегральной функцией $F_0(x)$ используют функцию Лапласа

$$\Phi(x) = \int_0^x \varphi(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (3.22)$$

которая отличается от $F_0(x)$ пределами интегрирования.

Функция $\Phi(x)$ табулирована, и ее значения приведены в приложении Б для положительных аргументов.

Функции $F_0(x)$ и $\Phi(x)$ связаны соотношением

$$F_0(x) = 0,5 + \Phi(x). \quad (3.23)$$

При этом следует иметь в виду правило знаков

$$\Phi(-x) = -\Phi(x), \quad (3.24)$$

что следует из формул (3.17) и (3.23).

Примечания

1 Выражение (3.23) очевидно из уравнения

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx = \int_{-\infty}^0 \varphi(x) dx + \int_0^x \varphi(x) dx = 0,5 + \Phi(x).$$

2 Табличный интеграл $\Phi(x)$ соответствует площади под кривой функции $\varphi(x)$ в интервале $[0, x]$ и определяет вероятность того, что значение случайной величины будет находиться в пределах от 0 до x . Так, например, для $t = 3s$ и $x = 3$ табличное значение интеграла $\Phi(3) = 0,49865$. Тогда, вероятность того, что случайная величина не превысит значение $t = 3s$, составит $F_0(3) = 0,5 + 0,49865 = 0,99865 \approx 0,999$.

В случае использования нормированной функции $\Phi(x)$ мы имеем следующие зависимости для $F(t)$, $P(t)$ и $F(t_1, t_2)$:

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - \mu}{s}\right); \quad (3.25)$$

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - \mu}{s}\right); \quad (3.26)$$

$$F(t_1, t_2) = \Phi\left(\frac{t_2 - \mu}{s}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - \mu}{s}\right). \quad (3.27)$$

Таким образом, при проведении инженерных расчетов характеристик показателей надежности пользуются соотношениями (3.18) – (3.20) и табличными значениями функций $\varphi(x)$, $F_0(x)$. В случае применения вместо функции $F_0(x)$ табличных интегралов $\Phi(x)$ используют уравнения (3.25) – (3.27).

Пример 3.2. Нароботка одного из узлов вагона подчиняется закону нормального распределения с параметрами $\mu = 6000$ км и $s = 1500$ км. Определить количественные характеристики $f(t)$, $F(t)$, $P(t)$ и $\lambda(t)$ для наработки $t = 2500$ км, а также 90%-ную наработку до отказа $t_{\gamma=90\%}$.

Решение.

1 Определим частоту отказов (плотность вероятности наработки до отказа) для $t = 2500$ км, используя формулу (3.9):

$$f(2500) = \frac{1}{1500\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(2500-6000)^2}{2 \cdot 1500^2}\right] = \frac{1}{1500\sqrt{2\pi}} \exp[-2,72] =$$

$$= \frac{1}{1500\sqrt{2 \cdot 3,14}} \exp[-2,72] = \frac{1}{1500 \cdot 2,506} 0,0659 = 0,175 \cdot 10^{-4} \text{ 1/км.}$$

Примечание – Значение $\exp[-2,72] = 0,0659$ берем из таблицы функции e^{-x} приложения Г.

Практически такой же результат получим по формуле (3.18), используя табличное значение дифференциальной функции нормированной нормально распределенной случайной величины $\varphi(x)$.

Для приведения нормального распределение с произвольными параметрами (μ , s) к стандартному нормальному закону с параметрами $\mu = 0$ и $s = 1$, т.е. с параметрами (0, 1), используем линейное преобразование $x = (t - \mu/s)$.

В нашем случае $x = \left(\frac{t - \mu}{s}\right) = \frac{2500 - 6000}{1500} = -2,33$. С учетом правила знаков и в соответствии с приложением Б $\varphi(-2,33) = \varphi(2,33) = 0,26426$. Тогда

$$f(2500) = (1/1500) \cdot 0,26426 = 0,176 \cdot 10^{-4} \text{ 1/км.}$$

2 Вычислим вероятность отказа за наработку $t = 2500$ км, используя табличные значения интегральной нормированной функции $F_0(x)$. Напомним, что для положительных значений $x - F(t) = F_0(x)$, для отрицательных $- F(t) = F_0(-x) = 1 - F_0(x)$.

Поскольку аргумент x функции $F_0(x)$ имеет отрицательное значение ($x = -2,33$), то $F(t) = F(-2,33) = 1 - F(2,33)$. Из приложения А следует, что табличное значение интегральной нормированной функции $F(2,33) = 0,99$.

Окончательно получим $F(2500) = 1 - F(2,33) = 1 - 0,99 = 0,01$.

Аналогичный результат мы получим, используя функцию Лапласа.

В соответствии с формулой (3.25) и с учетом правила знаков (3.24)

$$F(2500) = 0,5 + \Phi(-2,33) = 0,5 - \Phi(2,33).$$

Табличное значение интеграла $\Phi(2,33) = 0,490$ (см. приложение Б).

Тогда

$$F(2500) = 0,5 - \Phi(2,33) = 0,5 - 0,49 = 0,01.$$

3 Определим вероятность безотказной работы за наработку $t = 2500$ км:

$$P(2500) = 1 - F(2500) = 1 - 0,01 = 0,99.$$

4 Рассчитаем интенсивность отказов:

$$\lambda(2500) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{0,17 \cdot 10^{-4}}{0,99} = 0,1717 \cdot 10^{-4} \text{ 1/км.}$$

5 Вычисляем 90%-ную наработку до отказа $t_{\gamma=90\%}$, используя формулу (2.10) и квантиль нормированного нормального распределения u_{γ} , соответствующий вероятности $\gamma = 0,90$.

В соответствии с приложением В для $\gamma = 0,90$ табличное значение квантиля $u_{\gamma=0,90} = 1,282$. Тогда

$$t_{\gamma=0,90} = 6000 - 1,282 \cdot 1500 = 4077 \text{ км.}$$

Отсюда следует, что 90 % рассматриваемых узлов вагона будут иметь наработку, превышающую значение гамма-процентной наработки $t_{\gamma=0,90}$, равное 4077 км.

3.3 Усеченное нормальное распределение

Усеченным нормальным распределением случайной величины называется распределение, получаемое из нормального при ограничении интервала изменения случайной величины τ положительными значениями. Это распределение вносит уточнения в расчеты надежности по сравнению с нормальным распределением при больших значениях коэффициента вариации v .

Дифференциальная функция (плотность) распределения наработки до отказа

$$f(t) = \frac{c}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2s^2}\right], \quad (3.28)$$

где t_0 – мода, т.е. значение случайной величины, соответствующее максимуму $f(t)$;

c – коэффициент пропорциональности (нормирующий множитель усеченного нормального распределения),

$$c = \frac{1}{F_0(t_0/s)}; \quad (3.29)$$

$F_0(\dots)$ – интегральная нормированная функция $F_0(x)$, где $x = t_0/s$.

П р и м е ч а н и е – Функция плотности распределения усеченного нормального распределения записывается так же, как плотность нормального распределения, но с коэффициентом пропорциональности c .

Функция надежности (вероятность безотказной работы за наработку t)

$$P(t) = cF_0\left(\frac{t_0 - t}{s}\right) = \frac{F_0\left(\frac{t_0 - t}{s}\right)}{F_0\left(\frac{t_0}{s}\right)}; \quad (3.30)$$

Средняя наработка до первого отказа (математическое ожидание)

$$\begin{aligned} T_1 = m_t &= t_0 + \frac{c \cdot s}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-t_0^2/2s^2) = \\ &= t_0 + \frac{s}{F(t_0/s) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-t_0^2/2s^2). \end{aligned} \quad (3.31)$$

Примером усеченных распределений может быть распределение параметра качества изделий после отбраковки части изделий по этому параметру.

Пример 3.3. Наробotka элемента вагона до отказа подчинено усеченному нормальному закону с параметрами $t_0 = 8000$ км, $s = 2000$ км. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $f(t)$, $F(t)$, $P(t)$, $\lambda(t)$ и T_1 для наработки $t = 4000$ км.

Решение.

1 Вычислим вероятность безотказной работы и вероятность отказа, используя табличные значения интегральной нормированной функции $F_0(x)$:

$$\begin{aligned} P(4000) &= \frac{F_0\left(\frac{8000 - 4000}{2000}\right)}{F_0(4)} = \frac{F_0(2)}{F_0(4)} = \frac{0,97725}{1} = 0,97725; \\ F(4000) &= 1 - 0,97725 = 0,02275. \end{aligned}$$

Примечание – Из приложения А следует, что табличные значения $F_0(2) = 0,97725$, $F_0(4) = 1$.

2 Определим плотность распределения (частоту отказов) $f(t)$:

$$f(t) = \frac{c}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2s^2}\right] = \frac{1}{F_0(t_0/s) \cdot s\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2s^2}\right].$$

Вычисления удобно производить, используя таблицу дифференциальной нормированной функции $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$ (см. приложение Б). В нашем случае $x = (t - t_0)/s$.

Имея в виду, что $F_0(t_0/s) = F_0(8000/2000) = F_0(4) \approx 1$, т. е. $c = 1$, получим

$$f(4000) = \frac{\varphi(x)}{s} = \frac{\varphi\left(\frac{4000-8000}{2000}\right)}{2000} = \frac{\varphi(-2)}{2000} = \frac{\varphi(2)}{2000} = \frac{0,053991}{2000} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/км.}$$

3 Рассчитаем интенсивность отказов $\lambda(t)$, подставляя найденные значения $f(t)$ и $P(t)$ в выражение $\lambda(t) = f(t)/P(t)$:

$$\lambda(4000) = \frac{f(4000)}{P(4000)} = \frac{2,7 \cdot 10^{-5}}{0,97725} = 2,76 \cdot 10^{-5} \text{ 1/км.}$$

4 Вычислим среднюю наработку до отказа, используя выражение (3.31):

$$\begin{aligned} T_1 &= 8000 + \frac{2000}{\sqrt{2\pi} \cdot F_0(8000/2000)} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{8000}{2000}\right)^2\right] = \\ &= 8000 + \frac{2000 \cdot e^{-8}}{\sqrt{2\pi} \cdot F_0(4)} = 8000,26 \text{ км.} \end{aligned}$$

3.4. Логарифмически нормальное распределение

Логарифмически нормальное распределение описывает случайные величины, логарифм которых распределен по нормальному закону. В теории надежности закон *используют обычно для описания усталостных отказов.*

Логарифмически нормальное распределение существует только для неотрицательных случайных величин, поскольку отрицательные числа логарифма не имеют.

Дифференциальная функция распределения (плотность распределения) (рисунок 3.6)

$$f(\ln t) = \frac{1}{ts\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2s^2}\right), \quad (3.32)$$

где $\ln t$ – логарифм текущей переменной (рассматриваемой наработки);

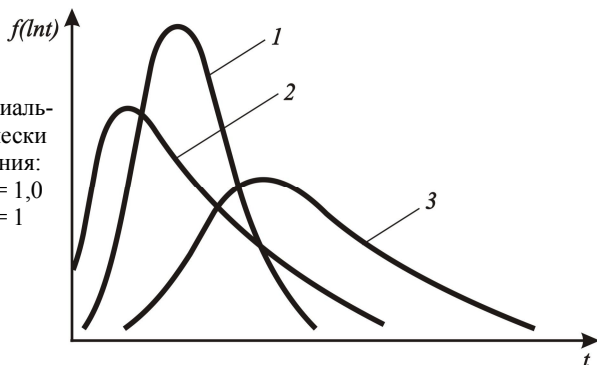
μ , s – параметры, оцениваемые по результатам испытаний (математическое ожидание и СКО натурального логарифма случайной величины).

Так, при испытаниях N объектов до отказа

$$\mu \approx \hat{\mu} = \frac{\sum \ln t_i}{N}; \quad s \approx \hat{s} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (\ln t_i - \hat{\mu})^2},$$

где $\hat{\mu}$ и \hat{s} – оценка параметров μ и s .

Рисунок 3.6 – Дифференциальная функция логарифмически нормального распределения:
 1 – $s = 0,5; \ln t_0 = 0$; 2 – $s = 1,0; \ln t_0 = 0$; 3 – $s = 0,5; \ln t_0 = 1$



Интегральную функцию и вероятность безотказной работы можно определить по таблицам для нормированного нормального распределения $F_0(x)$ в зависимости от значения квантиля $x = (\ln t - \mu) / s$:

интегральная функция распределения –

$$F(\ln t) = P\{\ln \tau < \ln t\} = F_0\left(\frac{\ln t - \mu}{s}\right); \quad (3.33)$$

функция надежности –

$$P(\ln t) = 1 - F_0\left(\frac{\ln t - \mu}{s}\right). \quad (3.34)$$

Математическое ожидание наработки до отказа и среднее квадратическое отклонение

$$m_t = \exp(\mu + s^2/2); \quad (3.35)$$

$$s = \sqrt{\exp(2\mu + s^2) \cdot (\exp s^2 - 1)}. \quad (3.36)$$

3.5. Распределение Вейбулла

Распределение Вейбулла используют в теории надежности как статистическую модель для описания наработки изделий до отказа или до предельного состояния.

В теории надежности оно является наиболее общим распределением наработки элементов до отказа (времени безотказной работы), наработки (времени работы) до предельного состояния машин, для описания распределений сроков службы других различных устройств, и поэтому его наиболее часто используют в расчетах показателей надежности.

Распределение Вейбулла имеет две разновидности – двух- и трехпараметрическое. На практике чаще встречается двухпараметрическое распределение.

Дифференциальная функция (плотность) распределения наработки до отказа (частота отказов)

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right], \quad (3.37)$$

где a – параметр масштаба, характеризующий степень растянутости кривой распределения вдоль оси t и связанный со средним значением случайной величины;

b – параметр формы.

Формула справедлива при $a > 0$ и $b > 0$.

Таким образом, это версия двухпараметрического закона Вейбулла.

Отличительная особенность закона распределения Вейбулла – правосторонняя асимметрия дифференциальной функции. Вследствие асимметрии в отличие от нормального закона среднее, модальное и медианное значения показателя надежности при законе распределения Вейбулла не равны между собой.

Интегральная функция распределения наработки до отказа (вероятность отказа за наработку t)

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right]. \quad (3.38)$$

Вероятность безотказной работы за наработку t

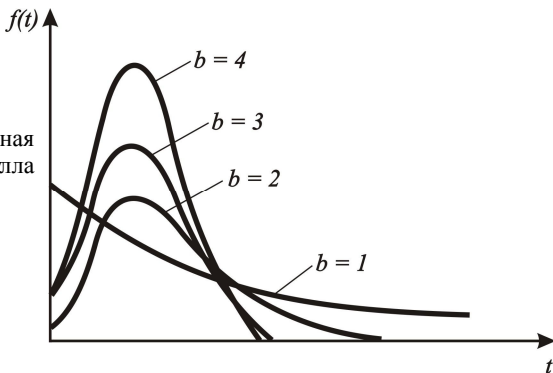
$$P(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right]. \quad (3.39)$$

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1}. \quad (3.40)$$

Графики функций $f(t)$ распределения Вейбулла для параметра $a = 1$ и различных значений параметра b приведены на рисунке 3.7.

Рисунок 3.7 – Дифференциальная функция распределения Вейбулла для параметра $a = 1$ и различных параметров b



Средняя наработка до первого отказа (математическое ожидание случайной величины τ)

$$T_1 = m_\tau = a \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right), \quad (3.41)$$

где $\Gamma(\dots)$ – гамма-функция, значения которой табулированы и приведены в приложении Д,

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) = \int_0^{\infty} x^{\frac{1}{b}} e^{-x} dx. \quad (3.42)$$

П р и м е ч а н и е – Гамма-функцией от аргумента n называется функция

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx.$$

Дисперсия случайной величины τ

$$D_\tau = a^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right) \right]. \quad (3.43)$$

Гамма-процентные показатели надежности при использовании распределения Вейбулла определяют по формуле (2.12).

При $b = 1$ распределение Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением.

Для того чтобы пользоваться законом распределение Вейбулла при оценке показателей надежности, необходимо определить параметры a и b по данным опытной эксплуатации.

Пример 3.4. Нароботка рассматриваемого элемента вагона до отказа подчинено распределению Вейбулла с параметрами $a = 500$ тыс. км, $b = 2$. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $f(t)$, $F(t)$, $P(t)$, $\lambda(t)$ и T_1 для $t = 100$ тыс. км.

Решение.

1 Вычислим вероятность безотказной работы за наработку t , используя табличные значения функции e^{-x} :

$$P(100) = \exp\left[-\left(\frac{100}{500}\right)^2\right] = \exp[-(0,2)^2] = \exp(-0,04) = 0,961.$$

Примечание – Табличное значение $\exp(-0,04) = 0,961$ (см. приложение Г).

2 Рассчитаем вероятность отказа за наработку t :

$$F(100) = 1 - P(100) = 1 - 0,961 = 0,039.$$

3 Определим плотность распределения (частоту отказов) $f(t)$:

$$f(100) = \frac{2}{500} \left(\frac{100}{500}\right)^{2-1} \cdot 0,961 = 0,004 \cdot 0,2 \cdot 0,961 = 7,69 \cdot 10^{-4} \text{ тыс. км}^{-1}.$$

4 Вычислим интенсивность отказов;

$$\lambda(100) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{7,69 \cdot 10^{-4}}{0,961} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ тыс. км}^{-1}.$$

5 Рассчитаем среднюю наработку до первого отказа, используя табличное значение гамма-функции $\Gamma(x)$.

В нашем случае $x = 1 + (1/k) = 1 + (1/2) = 1,5$. В соответствии с приложением Д $\Gamma(1,5) = 0,88623$. Тогда

$$T_1 = 500 \cdot 0,88623 = 443,12 \text{ тыс. км.}$$

3.6 Гамма-распределение

Это распределение является основным в математической статистике для случайных величин, ограниченных с одной стороны ($0 \leq t < \infty$).

Гамма-распределение является двухпараметрическим и служит для описания: износных отказов, отказов вследствие накопления повреждений, наработки системы с резервными элементами, распределения времени восстановления.

При различных параметрах гамма-распределение принимает самые разнообразные формы, что и объясняет его широкое применение.

Дифференциальная функция (плотность вероятности) гамма-распределения (при $t \geq 0$, $a > 0$, $b > 0$)

$$f(t) = \frac{t^{b-1}}{a^b \Gamma(b)} \exp\left(-\frac{t}{a}\right), \quad (3.44)$$

где a – параметр масштаба;

b – параметр формы;

$\Gamma(b)$ – табулированная полная гамма-функция,

$$\Gamma(b) = \int_0^{\infty} t^{b-1} \cdot \exp(-t) dt .$$

Интегральная функция распределения

$$F(t) = \frac{\Gamma(b, t/a)}{\Gamma(b)}, \quad (3.45)$$

где $\Gamma(b, x)$ – табулированная неполная гамма-функция,

$$\Gamma(b) = \int_0^{\infty} y^{b-1} \cdot \exp(-y) dy .$$

Примечание – Функция распределения выражается как отношение неполной гамма-функции $\Gamma(b, x)$ к полной $\Gamma(b)$.

Вероятность безотказной работы за наработку t

$$P(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = \exp\left(-\frac{t}{a}\right) \sum_{i=0}^{b-1} \frac{(t/a)^i}{i!}, \quad (3.46)$$

где $i!$ – i -факториал, $i! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot i$. Например, $0! = 1$, $1! = 1$ и $3! = 1 \cdot 2 \cdot 3 = 6$.

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \left(\frac{t^{b-1}}{a^b \Gamma(b)} \right) / \sum_{i=0}^{b-1} \frac{(t/a)^i}{i!}. \quad (3.47)$$

Средняя наработка до отказа (математическое ожидание)

$$T_1 = m_t = b a . \quad (3.48)$$

При изменении параметра a форма распределения не изменяется, а меняется только масштаб; при изменении b изменяется форма распределения. Графики функции $f(t)$ гамма-распределения показаны на рисунке 3.8.

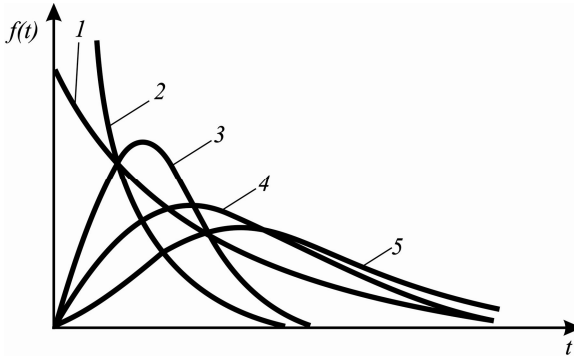


Рисунок 3.8 – Дифференциальная функция гамма-распределения:
 $1 - b = 0, a = 1; 2 - b = -0,5, a = 1; 3 - b = 1, a = 0,5; 4 - b = 1, a = 1; 5 - b = 2, a = 1$

Величина параметра b оказывает существенное влияние на вид основных количественных характеристик надежности. Например, при $b < 1$ интенсивность отказов монотонно убывает, что соответствует ситуации, когда происходит быстрое «выгорание ненадежных элементов»; при $b > 1$ интенсивность отказов возрастает, что характерно для постепенного изнашивания и старения элементов; при $b = 1$ гамма-распределение совпадает с экспоненциальным; при $b > 10$ гамма-распределение практически совпадает с нормальным распределением.

Если b – произвольное целое положительное число, то такое гамма-распределение называют **распределением Эрланга**.

Если $a = 1/2$, а значение b кратно $1/2$, то гамма-распределение совпадает с распределением хи-квадрат.

Пример 3.5. Нароботка одного из узлов вагона подчинено гамма-распределению с параметрами $a = 600$ тыс. км, $b = 2$. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $f(t)$, $F(t)$, $P(t)$, $\lambda(t)$ и T_1 для $t = 200$ тыс. км.

Р е ш е н и е.

1 Определим плотность распределения (частоту отказов) $f(t)$:

$$f(200) = \frac{200^{2-1}}{600^2 \Gamma(2)} \exp\left(-\frac{200}{600}\right) = \frac{200}{(6 \cdot 10^2)^2 \Gamma(2)} \exp(-0,333).$$

П р и м е ч а н и е – Табличные значения $\exp(-0,333) = 0,717$ и $\Gamma(2) = 1$ (см. приложения Г и Д).

Тогда

$$f(200) = \frac{200 \cdot 0,717}{(6 \cdot 10^2)^2 \cdot 1} = \frac{143,4}{36 \cdot 10^4} = 0,000398 = 3,98 \cdot 10^{-4} \text{ тыс. км}^{-1}.$$

2 Вычислим вероятность безотказной работы за наработку t .

Поскольку $i = 1$, $(b-1) = 0$, 1 , формула (3.46) будет иметь вид

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{a}\right) \left[\frac{(t/a)^0}{0!} + \frac{(t/a)^1}{1!} \right] = \exp\left(-\frac{t}{a}\right) \left[1 + \frac{t}{a} \right].$$

Отсюда

$$P(200) = \exp(-0,333) \left[1 + \frac{200}{600} \right] = 0,717 \cdot 1,333 = 0,956.$$

3 Рассчитаем вероятность отказа за наработку t :

$$F(200) = 1 - P(200) = 1 - 0,956 = 0,044.$$

4 Вычислим интенсивность отказов:

$$\lambda(200) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{3,98 \cdot 10^{-4}}{0,956} = 4,16 \cdot 10^{-4} \text{ тыс. км}^{-1}.$$

5 Рассчитаем среднюю наработку до первого отказа:

$$T_1 = m_t = 2 \cdot 600 = 1200 \text{ тыс. км.}$$

4 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

4.1 Общие сведения по расчету структурной надежности объекта

Надежность сложных изделий зависит от надежности его элементов. Как будет показано ниже, имеется точная математическая связь между надежностью изделия и надежностью его элементов. Уравнения, характеризующие эту связь, относятся к числу важнейших общих зависимостей теории надежности.

Для расчета надежности любой сложный объект, в том числе и вагон, условно расчленяется на элементы и системы. При этом один и тот же объект в зависимости от цели расчета можно рассматривать как элемент или как систему. Так, при оценке надежности вагона под элементами понимают составные части вагона (тележка, тормозное оборудование и др.). При оценке надежности составной части вагона, например тележки, ее рассматривают как систему, состоящую из основных элементов: колесных пар, буксовых узлов и др. В свою очередь колесную пару можно представить системой, образованной тремя элементами – двумя колесами и осью. Зачастую и детали рассматривают в качестве системы, элементами которой являются отдельные части детали, например части оси колесной пары.

Исходными данными для расчета надежности при проектировании являются структура проектируемого объекта с указанием типа и количества составляющих элементов и их взаимосвязи в смысле надежности. Расчет структурной (схемной) надежности изделия в целом можно производить, если известны надежность отдельных элементов, составляющих конструкцию, и характер их взаимодействия (структура конструкции).

В расчетную схему рекомендуется включать элементы [33]:

- отказы которых за рассматриваемый период (обычно, межремонтный период) могут привести к отказу вагона;
- которые имеют ограниченную контролепригодность в эксплуатации и отказы которых могут привести к крушению поезда.

Это позволит уменьшить число элементов, входящих в рассматриваемую систему, а, следовательно, уменьшить трудоемкость расчета.

Под элементом обычно понимают составную часть конструкции вагона, которая может характеризоваться собственными входными и выходными параметрами и которая рассматривается как неделимая в рамках решаемой задачи.

По условиям надежности различают следующие основные структурные схемы соединения элементов:

- *последовательное* (основное), когда отказ любого элемента приводит к отказу изделия в целом, но надежности элементов физически не зависят друг от друга (рисунок 4.1, а);
- *параллельное*, когда отказ изделия происходит только при отказе всех элементов, соединенных параллельно, а надежности отдельных элементов также взаимно независимы (рисунок 4.1, б)
- *смешанное* (последовательно-параллельное) (рисунок 4.1, в).

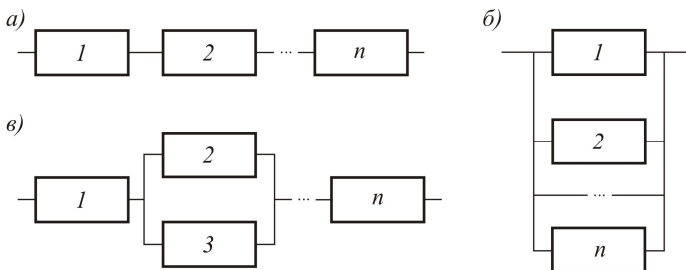


Рисунок 4.1 – Схема соединения элементов:
а – последовательное; б – параллельное; в – смешанное

Большинство изделий вагоностроения относится к схеме последовательного соединения. Схема параллельного соединения очень распространена в электронике, где на ее основе применяются системы с резервированием. В вагоностроении ее использовать сложнее.

Отметим, что здесь речь идет о схемах соединения элементов не в физическом смысле, а именно в смысле надежности. Рассмотрим, например, соединение боковых рам тележки грузового вагона или колес колесной пары. Конструктивно они соединены параллельно, а в смысле надежности – последовательно, поскольку отказ любой из рам приводит к отказу тележки, а отказ одного из колес – к отказу колесной пары.

Пружины рессорных комплектов соединены параллельно, но в смысле надежности их соединение нельзя однозначно отнести к параллельному.

Здесь не выполняется условие независимости отказов: отказ одной из пружин приводит к перераспределению нагрузки между другими.

4.2 Влияние схемы соединения элементов на надежность объектов

Надежность объектов при последовательном соединении элементов.
Вероятность безотказной работы системы (объекта) за наработку t (функция надежности) при последовательном соединении элементов

$$P_c(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_i(t)\dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (4.1)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы (функция надежности) i -го элемента, $i = \overline{1, n}$;

n – число последовательно соединенных элементов, отказ которых вызывает выход из строя всей системы.

Примечание – Вероятность безотказной работы $P(t)$ используется для оценки структурной надежности сложных объектов в силу того, что этот показатель зависит от времени и режима эксплуатации объектов, то есть наиболее полно определяет их надежность.

Тогда *вероятность отказа за наработку t*

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (4.2)$$

Замечание – Поясним получение формулы (4.1).

Надежность объекта при последовательном соединении определяется при условии, что отказ каждого элемента объекта является случайным независимым событием. В этом случае для определения вероятности безотказной работы объекта в целом можно использовать *теорему умножения вероятностей*, согласно которой *вероятность совместного проявления нескольких независимых событий равна произведению вероятности этих событий*, т. е. $P_c(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_i(t)\dots P_n(t)$.

Отказ любого элемента при последовательном соединении приводит к отказу системы (объекта).

Если объект состоит из равнонадежных элементов, то вероятность его безотказной работы за наработку t можно определить по формуле

$$P_c(t) = [P_i(t)]^n. \quad (4.3)$$

Вероятность безотказной работы системы можно выразить через интенсивность отказов ее элементов $\lambda_i(t)$ по формуле

$$P_c(t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt \right]. \quad (4.4)$$

З а м е ч а н и е – Для получения зависимости (4.4) воспользуемся формулами (2.19) и (4.1):

$$\begin{aligned} P_c(t) &= \exp \left[- \int_0^t \lambda_1(t) dt \right] \cdot \exp \left[- \int_0^t \lambda_2(t) dt \right] \dots \exp \left[- \int_0^t \lambda_i(t) dt \right] \dots \exp \left[- \int_0^t \lambda_n(t) dt \right] = \\ &= \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_n(t) dt \right]. \end{aligned}$$

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из равнонадежных элементов, при $P_i(t) = P(t)$ и $\lambda_i(t) = \lambda(t)$

$$P_c(t) = [P(t)]^n = \exp \left[- n \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (4.5)$$

Формулы (4.1), (4.3) – (4.5) позволяют определить вероятность безотказной работы системы при любых распределениях вероятностей наработки до отказа составляющих его элементов.

Пример 4.1. Определить функцию надежности для изделия, состоящего из 3, 5, 7 и 10 последовательно соединенных элементов соответственно с функцией надежности каждого из них 0,9.

Р е ш е н и е.

$$\begin{aligned} P_c(t) = 0,9^3 = 0,729; & \quad P_c(t) = 0,9^5 = 0,590; & \quad P_c(t) = 0,9^7 = 0,478; \\ P_c(t) = 0,9^{10} = 0,349. & & \end{aligned}$$

Из анализа формул (4.1) – (4.5) и приведенного примера можно сделать следующие **в ы в о д ы**.

1 *Чем больше в изделии последовательно соединенных элементов, тем ниже надежность объекта (системы).*

2 *При последовательном соединении элементов общая надежность всегда меньше надежности самого ненадежного элемента.*

Следовательно, для повышения надежности объекта (системы) на этапе проектирования необходимо:

- стремиться к возможно меньшему числу последовательно соединенных элементов;
- выявлять наименее надежные элементы и повышать их надежность.

Отсюда, усложнение конструкции по числу элементов должно сопровождаться обязательным повышением надежности тех ее элементов, отказы которых вызывают выход из строя конструкции (узла, сборочной единицы). Ввиду того, что надежность конструкции в целом определяет самый ненадежный элемент, то его выявление и есть важнейший этап в разработке мероприятий по обеспечению надежности объекта.

Отметим, что иногда конструктивное изменение одного-двух элементов обеспечивает резкое повышение надежности всего узла или изделия. К повышению надежности элементов системы приводит также их использование в «недогруженном» режиме и др.

Из формулы (4.4) следует, что интенсивность отказов системы в момент времени t равна сумме интенсивностей отказов составляющих ее элементов при любых распределениях вероятностей наработки до отказа элементов системы:

$$\lambda(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_i(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t).$$

Вероятность безотказной работы системы в период нормальной эксплуатации (при внезапных отказах постоянной интенсивности с экспоненциальным распределением наработки до отказа)

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\lambda t}, \quad (4.6)$$

где $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ – вероятность безотказной работы i -го элемента при экспоненциальном законе распределения.

Надежность объектов при параллельном соединении элементов.

Вероятность безотказной работы системы (объекта) за наработку t (функция надежности) при параллельном соединении элементов

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)], \quad (4.7)$$

где $Q_c(t)$ – результирующая вероятность отказа системы,

$$Q_c(t) = Q_1(t)Q_2(t)\dots Q_i(t)\dots Q_n(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)]; \quad (4.8)$$

$Q_i(t)$ – вероятность отказа i -го элемента;

n – число параллельно соединенных элементов.

Отказ любого элемента при параллельном соединении не приводит к отказу всей системы (объекта).

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из равнонадежных элементов, при $Q_i(t) = Q(t)$,

$$P_c(t) = 1 - Q^n(t) = 1 - [1 - P(t)]^n. \quad (4.9)$$

Пример 4.2. Определить функцию надежности изделия с тремя параллельно включенными резервными элементами с $P_i(t) = 0,9$ каждый и с пятью элементами с $P_1(t) = 0,95$; $P_2(t) = 0,92$; $P_3(t) = 0,9$; $P_4(t) = 0,85$; $P_5(t) = 0,8$.

Р е ш е н и е.

Надежность изделия:

с тремя резервными элементами –

$$P_c(t) = 1 - (1 - 0,9)^3 = 0,999;$$

с пятью резервными элементами –

$$\begin{aligned} P_c(t) &= 1 - [(1 - 0,95)(1 - 0,92)(1 - 0,9)(1 - 0,85)(1 - 0,8)] = \\ &= 1 - 0,05 \cdot 0,08 \cdot 0,1 \cdot 0,15 \cdot 0,2 = 0,9999. \end{aligned}$$

В ы в о д ы.

1 *При параллельном соединении элементов общая надежность изделия всегда выше надежности каждого из составляющих элементов.*

2 *Резервирование элементов в системе есть метод создания надежных систем из недостаточно надежных элементов.*

Отметим также, что при параллельном соединении в отличие от последовательного соединения надежность системы растет с увеличением резервных элементов.

Таким образом, *резервирование – одно из основных средств обеспечения заданного уровня надежности объекта при недостаточно надежных компонентах и элементах. Это эффективный способ повышения надежности вагонов и их узлов.* Цель резервирования – обеспечить безотказность объекта в целом, т. е. сохранить его работоспособность, когда возник отказ одного или нескольких элементов. При этом конструкционное резервирование усложняет конструкцию, увеличивает его массу, габаритные размеры и повышает стоимость.

Надежность объектов при смешанном соединении элементов. Как правило, большая часть элементов технических объектов, в смысле надежности, соединены последовательно. И только некоторые наиболее ответственные элементы – параллельно. В структурных схемах надежности со смешанным соединением элементов одновременно присутствуют последовательные и параллельные схемы надежности. Вероятность безотказной работы системы (объекта) при смешанном соединении элементов рассчиты-

вается по приведенным выше формулам для последовательного и параллельного соединений элементов, используя так называемый метод свертки. При его использовании сначала определяют вероятность безотказной работы для каждой группы параллельно соединенных элементов по формулам (4.7) или (4.9), приводя систему со смешанным соединением элементов к системе с последовательным их соединением. Далее вычисляют вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов по формулам (4.1) или (4.3). Например, для схемы, приведенной на рисунке 4.2, в расчет производят следующим образом.

Определяют надежность блоков A и B , элементы которых соединены последовательно:

$$P_A(t) = P_2(t) \cdot P_3(t); P_B(t) = P_4(t) \cdot P_5(t),$$

затем – надежность объединенного блока D с параллельно соединенными блоками A и B

$$P_D(t) = 1 - [(1 - P_A(t)) \cdot (1 - P_B(t))].$$

Надежность всей системы рассчитывают как систему последовательно соединенных элементов 1, D и 6:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_D(t) \cdot P_6(t).$$

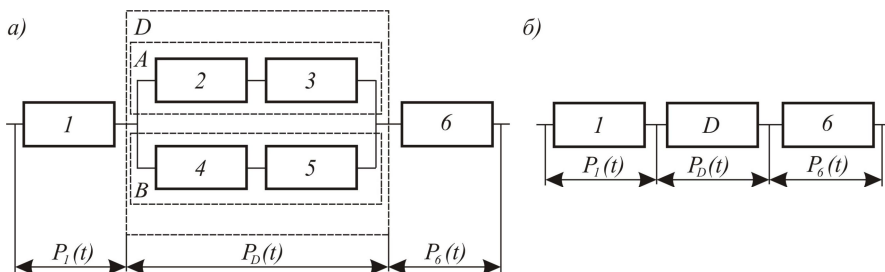


Рисунок 4.2 – К расчету надежности при смешанном соединении элементов:
 а – исходная структурная схема; б – преобразованная схема

4.3 Расчет структурной надежности вагона

Общая схема расчета структурной надежности вагона сводится к следующему.

Вагон как изделие расчленяют на « n » отдельных последовательно соединенных, в смысле надежности, составных частей (подсистем), например,

кузов, ходовые части, тормозное оборудование, автосцепное устройство. В свою очередь каждая составная часть включает, как правило, « m » последовательно соединенных элементов – узлов (деталей). На рисунке 4.3 приведена структурная схема вагона при расчете надежности. Отказ каждого узла (детали) ведет к отказу подсистемы, а отказ подсистемы – к отказу вагона.

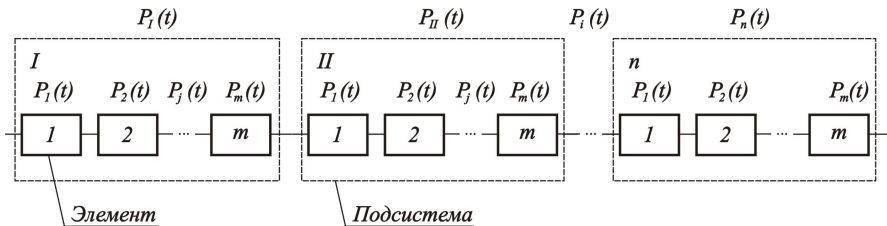


Рисунок 4.3 – Структурная схема вагона при расчете надежности

Вероятность безотказной работы вагона определяется как

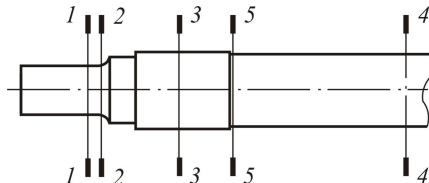
$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m P_{ij}(t). \quad (4.10)$$

Для использования формулы необходимо знать вероятности безотказной работы (показатели надежности) всех элементов каждой системы.

Для снижения числа элементов, включаемых в каждую расчетную систему, исключаем из рассмотрения элементы, отказы которых практически не влияют на работоспособность вагона и работоспособность которых за рассматриваемый промежуток времени практически не меняется.

Как уже отмечалось, при оценке надежности оси колесной пары в качестве элементов можно рассматривать ее отдельные части, которые могут быть представлены расчетными сечениями, проходящими через эти части. Расположение расчетных сечений оси показано на рисунке 4.4.

Рисунок 4.4 – Расчетные сечения оси колесной пары



Зная вероятность безотказной работы для каждого расчетного сечения, можно определить функцию надежности оси как единого целого:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_4(t) \cdot P_5(t),$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го расчетного сечения, $i = \overline{1, 5}$.

Для конкретной детали (элемента) возможны несколько видов отказов со случайным их сочетанием и смешанным влиянием на время и характер отказа детали. Предполагая начальную независимость разных видов отказов, вероятность безотказной работы детали (элемент) можно определить как произведение частных вероятностей:

$$P_{ij}(t) = \prod_{f=1}^k P_{ij}^f(t), \quad (4.11)$$

где k – число учитываемых видов отказов;

$P_{ij}^f(t)$ – вероятность безотказной работы детали (элемента) для f -го вида отказа.

Для анализа надежности вагона в целом, его расчетных составных частей и деталей по фактическим эксплуатационным данным можно использовать такой показатель надежности, как параметр потока отказов [23]:

$$\mu = \frac{\Omega(t_p)}{\bar{t}_p}, \quad (4.12)$$

где $\Omega(t_p)$ – среднее удельное количество отказов вагонов данного типа, расчетных частей или деталей за расчетный период эксплуатации;

\bar{t}_p – средняя наработка вагона за расчетный период эксплуатации до первого деповского ремонта (в годах, км пробега, т·км брутто, пассажиро·км и т.п.).

Параметр потока отказов вагона с учетом расчленения его на составные части, а частей – на отдельные детали (элементы) можно представить в виде

$$\mu_B = \sum_{i=1}^n \mu_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mu_{ji}, \quad (4.13)$$

где μ_i – параметр потока отказов i -й расчетной части вагона;

μ_{ji} – параметр потока отказов j -го элемента i -й расчетной части.

Параметр потока отказов новой или усовершенствованной расчетной части вагона при наличии данных об отказах такой же части вагона-аналога можно определить по формуле

$$\mu_i^H = \mu_i^a \left[1 - \sum_{j=1}^k \Delta\mu_{ji}^a \left(1 - \frac{\mu_{ji}^H}{\mu_{ji}^a} \right) \right], \quad (4.14)$$

где μ_i^a – параметр потока отказов i -й расчетной части вагона аналога;
 k – число элементов новой конструкции, подвергшихся изменениям;
 $\Delta\mu_{ji}^a$ – коэффициент (доля) отказов i -й расчетной части аналога по отказам j -го элемента, $\Delta\mu_{ji}^a = \mu_j^a / \mu_i^a$;
 μ_{ji}^H , μ_{ji}^a – параметры потока отказов j -го нового элемента и j -го элемента аналога, определяются экспериментальным, расчетным или экспертным путем.

В таблицах 4.1 и 4.2 приведены для справки коэффициенты (доли) отказов кузовов и рам основных типов универсальных грузовых вагонов, а также основных унифицированных узлов, применительно к конструкции 4-осного полувагона. Параметры потока отказов основных типов грузовых вагонов были показаны ранее в таблице 2.2.

Таблица 4.1 – Коэффициенты отказов кузовов и рам основных типов универсальных грузовых вагонов

| Тип и модель вагона | Коэффициенты отказов расчетной части $\Delta\mu_i$ | |
|---|--|-------|
| | кузов | рама |
| Полувагон 4-осный с люками и торцевыми дверями, модели 12-753, 12-757 | 0,23 | 0,006 |
| Крытый 4-осный вагон, модель 11-270 | 0,42 | 0,009 |
| Платформа 4-осная универсальная, модель 13-4012 | 0,25 | 0,009 |
| Цистерна 4-осная нефтебензиновая, модель 15-1424 | 0,025 | 0,004 |

Для определения показателей надежности применяют различные методы: расчетный, расчетно-экспериментальный и экспериментальный.

Расчетный метод определения надежности – метод, основанный на вычислении показателей надежности по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов объекта, по данным о надежности объекта, по данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту оценки надежности.

Расчетно-экспериментальный метод определения надежности – метод, при котором показатели надежности всех или некоторых составных частей объектов определяют по результатам испытаний и (или) эксплуата-

ции, а показатели надежности объекта в целом рассчитывают по математической модели.

Таблица 4.2 – Коэффициенты отказов унифицированных расчетных составных частей 4-осного универсального полувагона ($\mu_{\text{в}} = 0,56 \cdot 1/10^5 \text{ км}$)

| Наименование расчетной части и элемента | Коэффициенты отказов на вагонокомплект | |
|---|--|---------------------------|
| | расчетной части $\Delta\mu_i$ | элемента $\Delta\mu_{ji}$ |
| <i>Тележка в сборе</i> | 0,45 | – |
| Колесная пара (без букс) | | 0,62 |
| Букса роликовая в сборе | | 0,34 |
| Боковая рама | | 0,0005 |
| Надрессорная балка | | 0,0006 |
| Рессорный комплект | | 0,0045 |
| <i>Тормозное оборудование</i> | 0,10 | – |
| Триангель | | 0,05 |
| Башмак-подвеска | | 0,09 |
| Рычажная передача | | 0,04 |
| Тормозные приборы | | 0,18 |
| Трубопроводы и рукава | | 0,64 |
| <i>Автосцепное оборудование</i> | 0,08 | – |
| Корпус автосцепки в сборе | | 0,75 |
| Тяговый хомут | | 0,02 |
| Поглощающий аппарат в сборе | | 0,23 |

Экспериментальный метод определения надежности – метод, основанный на статистической обработке данных, получаемых при испытаниях или эксплуатации объекта в целом.

4.4 Резервирование как способ повышения надежности объектов

Основные виды, методы и способы резервирования. *Резервирование* – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функции. Отсюда, *любой способ резервирования основан на принципе избыточности.*

Цель резервирования – обеспечить безотказность объекта в целом, т. е. сохранить его работоспособность, когда возник отказ одного или нескольких элементов.

Примечания (ГОСТ 27.002–89)

Основной элемент – элемент объекта, необходимый для выполнения требуемых функций без использования резерва (элемент, на случай отказа которого предусмотрен резервный элемент).

Резервируемый элемент – основной элемент, на случай отказа которого в объекте предусмотрены один или несколько резервных элементов.

Резервный элемент – элемент, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего.

Нагруженный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента.

Ненагруженный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента.

Различают следующие виды резервирования:

- *структурное (конструкционное)* – резервирование путем введения в конструкцию (структуру объекта) дополнительных (резервных) элементов. Наряду с резервированием путем введения дополнительных (резервных) элементов находят широкое применение другие виды резервирования: временное, информационное, функциональное и нагрузочное;

- *временное* – резервирование с использованием резервов времени;

- *информационное* – резервирование с использованием резервов информации;

- *функциональное* – резервирование, при котором используется способность элементов выполнять дополнительные функции или способность объекта перераспределять функции между элементами;

- *нагрузочное* – резервирование, при котором используется способность элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных, а также способность объекта перераспределять нагрузки между элементами.

В теории надежности различают два метода резервирования (общий и раздельный) и два способа включения резерва (постоянный и замещением).

Методы резервирования. *Общее резервирование* – резервирование, при котором резервируется объект в целом. При *раздельном резервировании* резервируются отдельные элементы объекта (детали, узлы, сборочные единицы). Используется также сочетание общего и раздельного резервирования – *смешанное резервирование*.

Раздельное резервирование гораздо эффективнее общего. При этом эффективность резервирования (вероятность безотказной работы объекта) тем выше, чем меньшая часть объекта резервируется как единое целое.

Способы включения резерва. Различают два способа включения резерва – *постоянный (постоянное резервирование)* и *замещением (резервирование замещением)*.

Постоянное резервирование – резервирование, при котором резервные элементы функционируют наравне с основными в течение всего времени работы и находятся в одинаковом с ними режиме. Этот способ резерва называют нагруженным или горячим. Примером постоянного резервирования является параллельная работа нескольких ремней привода подвагонного генератора системы электроснабжения пассажирского вагона.

Вероятность отказа системы при постоянном резервировании определяется по формуле (4.7).

Резервирование замещением – резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента, т.е. резервные элементы включаются только при отказе основных. Этот способ резерва называют ненагруженным или холодным. Примером резервирования замещением является наличие у цистерны для перевозки жидких грузов трех затворов сливного прибора – основного и двух резервных дополнительных. При выходе из строя основного затвора его функции начинает выполнять один из двух дополнительных затворов. Наличие резервных элементов обеспечивает надежную работу сливного прибора и исключает возможность утечки перевозимого груза.

При резервировании замещением основные и резервные элементы можно рассматривать как единую систему, в которой допускается несколько отказов до того, как она прекратит выполнение своих функций. Поэтому вероятность отказа системы, содержащей n одинаковых элементов, из которых один основной и $(n - 1)$ резервных, в период нормальной эксплуатации и экспоненциальном распределении отказов определяется по формуле [3]

$$Q_c(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} \exp(-\lambda t). \quad (4.15)$$

При высоконадежных элементах λt мало, $\exp(-\lambda t) \approx 1$ и $\lambda t \approx Q(t)$. Тогда

$$Q_c(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} = \frac{Q^n(t)}{n!}, \quad (4.16)$$

где $n!$ – n -факториал.

Из формул (4.8) и (4.16) следует, что *вероятность отказа при резервировании замещением в $n!$ раз меньше, чем при постоянном резервировании*, так как резервные элементы не находятся под нагрузкой.

П р и м е ч а н и е – Формула (4.16) справедлива при условии надежной передачи функций резервному элементу. Если передача функций недостаточно надежна, то выигрыша может не быть.

Отметим, что применение конструкционного резервирования или структурной избыточности для вагона затруднено тем, что важнейшими ограни-

чениями для него является необходимость соблюдения габаритных размеров и массы тары.

И, тем не менее, наиболее ненадежные элементы вагона зарезервированы, благодаря существованию на сети железных дорог системы обеспечения вагонов запасными частями. Применение запасных частей также можно рассматривать как вид конструкционного (структурного) резервирования.

В терминах теории надежности *вагон представляет собой систему, наиболее ненадежные элементы которой имеют резервные элементы*, работающие по схеме «ненагруженный резерв» [33]. Переключатель (осмотрщик-ремонтник), являющийся ненадежным элементом (осмотрщик не заметил неисправную деталь), включает резервный элемент взамен отказавшего с запозданием, величина которого ограничена временем проследования поезда по перегону, так что конструкция представляет собой как бы «дискретно-резервизированную систему», которая должна отказывать в периоды запоздания. Но благодаря наличию других видов избыточности, этого не происходит.

Поясим временную и функциональную избыточности, которые используются для повышения надежности вагонов.

Временное резервирование обеспечивается режимом использования вагона по назначению и системой технического обслуживания. Например, перерывы в работе вагона на погрузку и разгрузку, а также стоянки поезда по расписанию создают возможность своевременного профилактического устранения возникающих неисправностей.

Функциональная избыточность обусловлена внутренним свойством конструкции и означает способность некоторых элементов, при выходе из строя других, выполнять хотя бы частично их функции. Так, при неудовлетворительной работе смазки буксового узла полиамидные сепараторы, обладая хорошими антифрикционными качествами, в аварийном режиме выполняют роль смазки, предотвращая излом шейки оси. При поломке одной из параллельно работающих пружин рессорного комплекта ее функции будут частично выполнять другие пружины комплекта.

Функциональная и временная избыточности представляют собой скрытый резерв надежности конструкции вагона. Следовательно, наличие конструкционной, временной и функциональной избыточности позволяет продолжительно использовать вагон по назначению.

Сравнительный анализ эффективности различных вариантов структурного резервирования. Выполним такой анализ на примере системы из трех элементов с вероятностью безотказной работы каждого $P_i(t) = 0,9$ и вероятностью отказа $Q_i(t) = 0,1$.

Структурные схемы различных методов и способов резервирования показаны на рисунке 4.5.

Система без резервирования – система из последовательно соединенных элементов (рисунок 4.5, а):

$$P_c^0(t) = P_1^3(t) = 0,9^3 = 0,729; \quad Q_c^0(t) = 1 - 0,729 = 0,271.$$

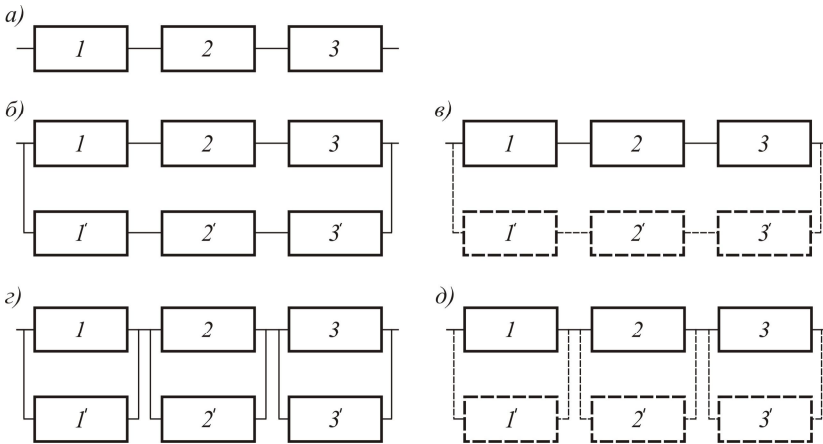


Рисунок 4.5 – Структурные схемы различных видов резервирования:

а – система без резервирования; б, в – общее резервирование системы;

г, д – раздельное резервирование системы

Общее постоянное резервирование системы (рисунок 4.5, б):

$$Q_c(t) = [Q_c^0(t)]^2 = 0,271^2 = 0,073; \quad P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - 0,073 = 0,927.$$

П р и м е ч а н и е – Основная и резервная системы представляют собой блоки из трех последовательно соединенных элементов. Вероятность отказа каждого из блоков рассчитана выше и равна $Q_c^0(t) = 0,271$. При этом основной и резервный блоки соединены параллельно. Тогда вероятность безотказной работы и вероятность отказа системы в целом, согласно формулам (4.7) и (4.8), составит

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^2 Q_i(t) \text{ и } P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 Q_i(t).$$

Общее резервирование системы замещением при надежном переключении (рисунок 4.5, в):

$$Q_c(t) = \frac{[Q_c^0(t)]^2}{2!} = \frac{0,271^2}{2!} = 0,136; \quad P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - 0,136 = 0,864.$$

Примечание – Для определения $Q_c(t)$ воспользуемся формулой (4.12), где n – число блоков элементов (основных и резервных), входящих в систему, $n = 2$.

Раздельное постоянное резервирование каждого элемента системы (рисунок 4.5, з):

$$P_c(t) = [1 - Q_i^2(t)]^3 = (1 - 0,1^2)^3 = 0,97; \quad Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - 0,97 = 0,03.$$

Примечание – Система состоит из трех блоков при поэлементном резервировании. В каждом блоке элементы соединены параллельно, а сами блоки между собой – последовательно.

Для каждого из трех блоков вероятность безотказной работы с учетом равенства $Q_i(t)$ для всех элементов будет равна

$$P_I(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 Q_i(t) = 1 - Q_i^2(t), \quad P_{II}(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 Q_i(t) = 1 - Q_i^2(t),$$

$$P_{III}(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 Q_i(t) = 1 - Q_i^2(t).$$

Вероятность безотказной работы системы в целом

$$P_c(t) = P_I(t) P_{II}(t) P_{III}(t) = [1 - Q_i^2(t)]^3.$$

Раздельное резервирование замещением каждого элемента системы (рисунок 4.5, д):

$$P_c(t) = \left[1 - \frac{Q_i^2(t)}{2!} \right]^3 = \left[1 - \frac{0,1^2}{2!} \right]^3 = [1 - 0,05]^3 = (0,995)^3 = 0,985;$$

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - 0,985 = 0,015.$$

Примечание – Величину $P_c(t)$ определяют как $P_c(t) = 1 - Q_c(t)$, где $Q_c(t)$ вычисляют по формуле (4.12), $n = 2$.

Отсюда следует, что *раздельное резервирование намного эффективнее общего, а резервирование замещением при надежном переключении эффективнее постоянного.*

5 ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВАГОНОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

5.1 Требования, предъявляемые к организации испытаний

Основные положения экспериментальной оценки надежности. Под *экспериментальной оценкой надежности* понимается определение и контроль различных показателей по результатам испытаний или наблюдений в процессе эксплуатации. Отсюда следует, что источниками информации о техническом состоянии вагонов могут быть испытания (стендовые, ударные, ходовые) или данные реальной эксплуатации вагонов. Для оценки надежности вагонов применяется второй способ получения информации, так как стендовые испытания на надежность на ВСЗ, как правило, не проводятся.

Как отмечается в работе [33], *нормальную эксплуатацию можно считать «стендом» для испытаний на надежность вагонных конструкций*. А сами *испытания* можно назвать *эксплуатационными*. Поэтому в дальнейшем будем применять обобщающий термин «испытания».

Примечания

Определение надежности – определение численных значений показателей надежности объекта (ГОСТ 27.002).

Испытания на надежность – испытания, проводимые для определения показателей надежности (ГОСТ 16504).

Эксплуатационные испытания на надежность – испытания, проводимые в условиях эксплуатации объекта (ГОСТ 27.002).

Основными целями экспериментальной оценки надежности являются:

- определение фактических значений показателей надежности;
- контроль соответствия изделия заданному требованию.

Определительная и контрольная постановка задачи имеют существенные отличия. В учебном пособии будем рассматривать определительную постановку задачи.

Экспериментальные оценки показателей надежности позволяют:

- во-первых, оценить реальный уровень надежности изделия и обосновать необходимость мероприятий по повышению надежности (результаты

испытаний вагонов используются в качестве обратной связи в управлении процессом совершенствования их конструкции);

- во-вторых, производить априорную оценку надежности вновь разрабатываемых изделий.

Точность и достоверность экспериментальных оценок определяют эффективность мероприятий по обеспечению надежности на всех этапах цикла «проектирование – производство – эксплуатация».

Можно выделить два этапа в подготовке испытаний на надежность. *Первый этап* включает ознакомление с конструктивными особенностями изделия, режимами его эксплуатации, изучение и предварительный анализ наблюдавшихся отказов. *Второй этап* посвящен планированию испытаний.

Вопросы организации испытаний являются общими при любых видах испытаний на надежность.

Основные факторы, учитываемые при организации испытаний.

При организации испытаний следует обратить внимание на *выбор объектов испытаний, периодичность контроля, режим эксплуатации и условия окружающей среды*.

Сбор информации о надежности проводится как для вагона в целом, так и для его составных частей.

Объектами испытаний (наблюдений) являются однотипные изделия (вагоны и их элементы), не имеющие конструктивных различий и изготовленные по единой технологии и одновременно поставленные под наблюдение.

Периодичность контроля за изделиями в процессе испытаний может быть постоянной (непрерывной) и периодической. Наиболее полную информацию дает непрерывный контроль, который позволяет фиксировать моменты отказов изделий. Однако такой контроль не всегда может быть обеспечен.

Как правило, постоянные наблюдения проводятся для изделий, отказ которых связан с опасностью для человека или может привести к большим экономическим потерям, а также для изделий мелкосерийного и индивидуального производства.

Периодические наблюдения проводятся для изделий серийного и массового производства.

Режим эксплуатации и условия окружающей среды оказывают существенное влияние на уровень фактической надежности изделия.

Если изделие предназначено для функционирования в широком диапазоне параметров среды, то целесообразно задавать и проверять показатели надежности для различных (например, граничных) значений параметров среды. Например, вагон работает в диапазоне температур от $+40$ до -60 °С. Если задан уровень показателя надежности и специально не оговорены со-

ответствующие условия, то при испытаниях следует обеспечить наиболее характерные для данного изделия условия функционирования.

Основные этапы для получения оценок показателей надежности. *Вычисление оценок показателей надежности предполагает:*

- 1 Выбор плана испытаний на надежность.
- 2 Планирование испытаний (определение требуемого объема испытаний).
- 3 Сбор необходимой информации.
- 4 Статистическую обработку информации (оценку показателей надежности).

Примечания (ГОСТ 27.002–89).

План испытаний на надежность – совокупность правил, устанавливающих объем выборки, порядок проведения испытаний, критерии их завершения и принятия решений по результатам испытаний.

Объем испытаний на надежность – характеристика правил испытаний на надежность, включающая число испытываемых образцов, суммарную продолжительность испытаний в единицах наработки и (или) число серий испытаний.

Рассмотрим эти этапы.

5.2 Выбор плана испытаний на надежность

Многие требования, предъявляемые к испытаниям, отражены в виде так называемых планов испытаний (наблюдений).

План испытаний на надежность устанавливает:

- число объектов испытаний;
- порядок проведения испытаний (с восстановлением работоспособного состояния изделия после отказа, заменой отказавшего изделия или без восстановления и замены);
- критерий прекращения испытаний.

Напомним, что объектами испытаний являются однотипные изделия, не имеющие конструктивных или других различий, изготовленные по единой технологии и испытываемые в идентичных условиях.

Выбор плана испытаний зависит от типа объекта испытаний, целей испытаний, оцениваемых показателей надежности, условий испытаний и других технико-экономических факторов.

В процессе сбора информации о надежности элементов вагона возможны различные варианты планов испытаний (наблюдений).

Стандарт (ГОСТ 27.410) предусматривает **16 планов испытаний**. Основными из них являются:

$[NUN]$, $[NUT]$, $[NUr]$, $[NRT]$, $[NRr]$, $[NR(r; T)]$, $[NMT]$, $[NMf]$,

где N – число объектов, поставленных под наблюдение;

U – планы, в которых отказавшие объекты не восстанавливаются и не заменяются новыми (*отсутствие замены или восстановления*);

R – планы, в которых отказавшие объекты заменяются новыми (*замена отказавших изделий*);

M – планы, в которых отказавшие объекты восстанавливаются (*восстановление отказавших изделий*);

T – установленная наработка или календарная продолжительность наблюдений (*фиксированный отрезок времени (наработки) наблюдений*);

r – число отказов или предельных состояний, до возникновения которых ведутся наблюдения;

$(r; T)$ – означает, что наблюдения прерываются в момент $(t_r, T)_{\min}$, т.е. в момент t_r наступления r -го отказа или в заданный момент времени T в зависимости от того, какой из них наступит раньше (*критерий прекращения наблюдений*).

Структура шифра плана наблюдений приведена на рисунке 5.1.

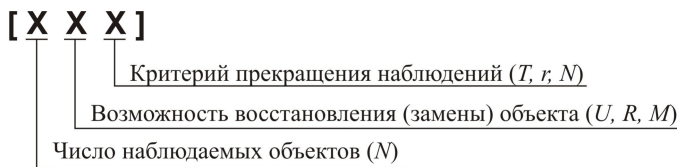


Рисунок 5.1 – Структура шифра плана наблюдений

Каждый план (каждая стратегия) испытаний (наблюдений) записывается в скобках сочетанием трех соответствующих символов, обозначающих основные факторы испытаний: N, U, R, M, T, r . При этом предполагается, что изделия подвергаются испытаниям одновременно и контроль осуществляется непрерывно. Первый символ характеризует количество объектов N , предназначенных для наблюдений; второй – действия с отказавшими объектами: U – отсутствие замены или восстановления отказавших объектов; R – замена отказавших объектов; M – восстановление отказавших объектов; третий – (одна или две буквы) определяет критерий (признак) окончания наблюдений: по достижении определенного числа отказов r или истечении фиксированного интервала времени или наработки T .

План наблюдений [NUT] означает, что под наблюдение поставлено N объектов, отказавшие объекты не восстанавливаются и не заменяются новыми (U), наблюдение заканчивается по истечении времени или наработки T .

План наблюдений [NRr] – под наблюдение поставлено N объектов, отказавшие объекты заменяются новыми (R), наблюдение ведется до возникновения r отказов или предельных состояний.

Примечания

Как уже отмечалось, при проведении испытаний предполагается, что изделия подвергаются испытаниям одновременно и контроль осуществляется непрерывно.

Поскольку на практике эти условия зачастую не выполняются, используются дополнительно следующие обозначения для реальных планов испытаний:

1 Если изделия поступают на испытания неодновременно или снимаются с испытаний в произвольные моменты времени по каким-либо причинам, то такие планы обозначаются так же, но заключаются в круглые скобки (...).

2 Если при испытаниях контроль производится периодически, через определенные интервалы времени (наработки), то соответствующее условное обозначение заключается в двойные скобки (круглые или квадратные), например, ((...)).

3 Когда каждое из N изделий испытывается в течение фиксированной наработки T , а контроль производится только перед началом и по окончании испытаний, то соответствующее условное обозначение стратегии заключается в фигурные скобки {...}. Эта схема испытаний является предельным случаем периодического контроля.

Выбор плана испытаний для обследуемых объектов определяется режимом их работы и задачами исследователя.

Рекомендации по выбору планов испытаний приведены в РД 50-690–89.

По невозстановливаемым объектам для оценки показателей надежности используют планы испытаний:

- средней наработки до отказа, гамма-процентной наработки до отказа, интенсивности отказов – $[NUN]$, $[NUT]$, $[NUR]$, $[NRT]$, $[NRr]$ (причем для сокращения продолжительности испытаний применяют планы $[NRT]$, $[NRr]$);

- вероятности безотказной работы – $[NUT]$.

По восстанавливаемым (ремонтируемым) объектам используют планы испытаний:

- средней наработки на отказ – $[NMT]$, $[NMr]$;

- среднего ресурса (срока службы), гамма-процентного ресурса (срока службы) – $[NUN]$, $[NUT]$, $[NUR]$, $[NRT]$, $[NRr]$ (причем для сокращения продолжительности испытаний применяют планы $[NRT]$, $[NRr]$, для повышения точности оценок показателей – $[NUN]$);

- среднего времени восстановления и коэффициента готовности – планы испытаний $[NMT]$, $[NMr]$.

При сборе информации о надежности элементов вагона наиболее подходящими являются планы $[NUT]$ и $[NRT]$. Это планы с фиксированной длительностью испытаний, так называемые усеченные по времени планы. План $[NRT]$ наиболее естественен при организации испытаний на долговечность.

5.3 Планирование испытаний на надежность (определение требуемого объема испытаний)

Общие сведения. Планирование испытаний на надежность предусматривает определение требуемого объема испытаний для вычисления оценок показателей надежности с заданной точностью и достоверностью.

Под заданной точностью имеют в виду относительную ошибку ε в оценке показателя надежности, *под заданной достоверностью* – доверительную вероятность q

Под объемом испытаний понимают:

- для плана $[NUN]$ – число объектов испытаний N ;
- планов $[NUr]$, $[NMr]$ и $[Nrr]$ – число объектов испытаний N и число отказов (предельных состояний) r ;
- планов $[NUT]$, $[NMT]$ и $[NRT]$ – число объектов испытаний N и продолжительность испытаний T .

Исходные данные для расчета объема испытаний:

- 1) предельная относительная ошибка ε интервальной оценки соответствующего показателя надежности (заданная точность);
- 2) доверительная вероятность q оценки соответствующего показателя надежности (заданная достоверность);
- 3) коэффициент вариации v распределения случайной величины;
- 4) регламентированная вероятность $\gamma/100$ (для оценки гамма-процентных показателей);
- 5) объем совокупности M (для совокупности ограниченного объема)

В качестве случайной величины рассматривают наработку до отказа, наработку между отказами, ресурс, срок службы, время восстановления, срок сохраняемости.

Предельная относительная ошибка ε оценки соответствующего показателя надежности

$$\varepsilon = \left\{ \frac{\widehat{R} - \underline{R}}{\widehat{R}}; \frac{\overline{R} - \widehat{R}}{\widehat{R}} \right\},$$

где \widehat{R} – оценка показателя надежности R ;

\underline{R} – нижняя доверительная граница показателя надежности R ;

\overline{R} – верхняя доверительная граница показателя надежности R .

В соответствии с РД 50-690–89 предельную относительную ошибку (относительную ошибку) ε выбирают из ряда: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20, доверительную вероятность q – из ряда: 0,80; 0,90; 0,95; 0,99.

Рекомендуются следующие сочетания значений ε и q :

- для составных частей изделия, влияющих на безопасность, – $\varepsilon = 0,05$; $q = 0,95; 0,99$;
- базовых составных частей изделия – $\varepsilon = 0,10; 0,15$; $q = 0,90; 0,95$;
- деталей, обуславливающих внешний вид изделия, его комфортабельность, – $\varepsilon = 0,15; 0,20$; $q = 0,80; 0,90$;
- изделий массового и серийного производств – $\varepsilon = 0,10$; $q = 0,90$.

Рассмотрим определение объема испытаний для планов $[NUN]$, $[NUT]$ и $[NRT]$.

Определение объема испытаний для плана $[NUN]$. Если вид закона распределения случайной величины известен, то объем испытаний N определяют в соответствии с РД 50-690–89 по таблицам 5–19 – для оценки средних показателей надежности и по таблицам 20–25 – для оценки гамма-процентных показателей. Таблицы позволяют определить число N объектов испытаний для известных закона распределения случайной величины и значений ε , q и ν . При этом таблицы 5–9 используют для совокупностей неограниченного объема, таблицы 10–19 – для совокупностей ограниченного объема.

Если по результатам испытаний получен коэффициент вариации больше заданного, то число объектов испытаний пересчитывают для найденного коэффициента вариации $\hat{\nu}$ и испытания продолжают.

Примечание – К гамма-процентным показателям надежности относят гамма-процентную наработку до отказа, гамма-процентный ресурс (срок службы), к средним показателям надежности – среднюю наработку до отказа (между отказами), средний ресурс (срок службы, время восстановления).

Если вид закона распределения случайной величины неизвестен, объем испытаний находится в предположении, что случайная величина имеет распределения Вейбулла и логарифмически нормальное. В качестве окончательного объема испытаний принимают максимальное значение.

Пример 5.1. Для плана испытаний $[NUN]$ определить число N объектов испытаний, чтобы с доверительной вероятностью $q = 0,95$ предельная относительная ошибка ε в определении средней наработки до отказа не превышала 0,10. Предполагается, что наработка до отказа имеет распределение Вейбулла с коэффициентом вариации $\nu = 0,40$.

Решение. По таблице 6 [30] для распределения Вейбулла и $\varepsilon = 0,10$; $q = 0,95$; $\nu = 0,40$ находим $N = 50$.

По результатам испытаний 50 объектов получен коэффициент вариации $\hat{\nu} = 0,50$. Поскольку $\hat{\nu} > \nu$, то определяем дополнительное число объектов, которые необходимо поставить на испытание. Для $\varepsilon = 0,10$; $q = 0,95$ и $\nu = 0,50$ по таблице 6 находим $N = 80$.

По результатам испытаний 80 объектов получен коэффициент вариации $\hat{\nu}_2 = 0,45$. Так как $\hat{\nu}_2 < 0,50$, то пересчет не требуется, и испытания завершаются.

Пример 5.2. Для плана испытаний $[NUN]$ определить число N объектов испытаний, чтобы с доверительной вероятностью $q = 0,90$ предельная относительная ошибка ε в определении средней наработки до отказа для объема совокупности $M = 50$, не превышала 0,20. Предполагается, что наработка до отказа имеет нормальное распределение с коэффициентом вариации $\nu = 0,30$.

Решение. По таблице 14 [30] при $M = 50$ для нормального распределения и $\varepsilon = 0,20$; $q = 0,90$; $\nu = 0,30$ находим $N = 3$.

По результатам испытаний трех объектов получен коэффициент вариации $\hat{\nu} = 0,25$. Так как $\hat{\nu} < 0,30$, то пересчета объема испытаний не требуется, и испытания могут быть завершены.

Пример 5.3. Для плана испытаний $[NUN]$ определить число N объектов испытаний, чтобы с доверительной вероятностью $q = 0,80$ предельная относительная ошибка ε в определении средней наработки до отказа не превышала 0,20. Предполагаемый коэффициент вариации $\nu = 0,50$. Закон распределения наработки до отказа неизвестен.

Решение. По таблицам 6 и 8 [30] находим число объектов испытаний для распределений Вейбулла и логарифмически нормального. Получаем соответственно $N = 8$ и $N = 4$. Принимаем в качестве окончательного значения объем выборки $N = 8$.

Определение объема испытаний для плана $[NUT]$. Рассмотрим последовательность определения числа N объектов испытаний при известном и неизвестном видах закона распределения.

1 Определение объема выборки для оценки средних и гамма-процентных показателей при известном виде закона распределения:

а) устанавливают прогнозируемое число отказов (предельных состояний) r по таблицам 5-9 и 20-25 [30] для плана $[NUN]$, учитывая вид закона распределения и полагая вместо N значение r ;

б) для найденного значения r вычисляют объем выборки N в предположении, что задана относительная продолжительность испытаний ψ по формулам:

для нормального распределения –

$$N = \left\{ r / F_0 \left(\frac{\psi - 1}{\nu} \right) \right\}; \quad (5.1)$$

распределения Вейбулла (экспоненциального) –

$$N = \left\{ \frac{\exp[\psi \cdot \Gamma(1 + 1/b)]^b (r - 0,5) + 0,5}{\exp[\psi \cdot \Gamma(1 + 1/b)]^b - 1} \right\}; \quad (5.2)$$

логарифмически нормального распределения –

$$N = \left\{ r / F_0 \left(\ln \psi / \sqrt{\ln(v^2 + 1)} \right) \right\}, \quad (5.3)$$

где ψ – относительная продолжительность испытаний, $\psi = T_{\text{и}}/T_{\text{ср}}$;

$T_{\text{и}}$ – продолжительность испытаний;

$T_{\text{ср}}$ – средний показатель надежности;

$F_0(\dots)$ – функция нормального распределения (нормированного);

$\Gamma(\dots)$ – гамма-функция;

a, b – параметры закона Вейбулла.

Примечания

1 Аналогично определяют объем испытаний для плана $[NUT]$.

2 Таким образом, объем выборки N для планов $[NUT]$ и $[NUT]$ определяют в предположении, что известны как исходные данные для расчета испытаний ($q, \varepsilon, \nu, \gamma$), так и относительная продолжительность испытаний ψ .

2 Объем выборки для оценки вероятности безотказной работы и гамма-процентных показателей при неизвестном виде закона распределения определяют по таблице 26 [30], предполагая известным значение числа отказов (предельных состояний) r для заданных q, γ .

Если по результатам испытаний N объектов за время T получено число отказов (предельных состояний) r меньше прогнозируемого, то испытания следует продолжить до наступления r отказов (предельных состояний) или снизить требования к точности и (или) достоверности оценки показателя.

Пример 5.4. Для плана испытаний $[NUT]$ определить число N объектов испытаний, чтобы с доверительной вероятностью $q = 0,95$ предельная относительная ошибка ε в определении средней наработки до отказа не превышала 0,10.

Предполагается, что наработка до отказа имеет нормальное распределение с коэффициентом вариации $\nu = 0,20$, относительная продолжительность испытаний $\psi = 1$.

Решение. По таблице 5 [30] (для плана $[NUN]$ и нормального распределения) для $\varepsilon = 0,10$; $q = 0,95$ и $\nu = 0,20$ находим прогнозируемое число отказов $r = 13$.

Для найденного значения r определяем объем выборки N по формуле (5.1):

$$N = \left\{ 13 / F_0 \left(\frac{1-1}{0,2} \right) \right\} = \{ 13 / F_0(0) \} = 26.$$

Примечание – Значение $F_0(\dots)$ берем из таблицы приложения А для значений функции нормированного нормального распределения: $F_0(0) = 0,500$.

Пример 5.5. Для плана испытаний $[NUT]$ определить число N объектов испытаний, чтобы с доверительной вероятностью $q = 0,90$ определить 90%-й ресурс объектов. Закон распределения ресурса неизвестен. Установленное число предельных состояний $r = 10$.

Р е ш е н и е. По таблице 26 [30] (для плана $[NUr]$) для $\gamma\%/100 = 0,90$, $q = 0,90$ и $r = 10$ находим объем выборки $N = 150$.

Определение объема испытаний для плана $[NRT]$. Рассмотрим порядок *определения объема выборки для оценки средней наработки на отказ (до отказа)*:

а) устанавливают прогнозируемое число отказов r по таблице 27 [30] в предположении экспоненциального закона распределения наработки между отказами (до отказа);

б) вычисляют объем выборки N по формуле

$$N = r/\psi . \quad (5.4)$$

П р и м е ч а н и е – Аналогично определяют объем испытаний для плана $[NRr]$.

Пример 5.6. Для плана испытаний $[NRT]$ определить число N объектов испытаний, чтобы с доверительной вероятностью $q = 0,90$ предельная относительная ошибка ε в определении средней наработки до отказа не превышала $0,15$. Предполагается, что наработка между отказами распределена экспоненциально и относительная продолжительность испытаний $\psi = 2$.

Р е ш е н и е. По таблице 27 [30] для $\varepsilon = 0,15$ и $q = 0,80$ находим прогнозируемое число отказов $r = 56$.

Для найденного значения r и заданного ψ определяем по формуле (5.4) объем выборки:

$$N = 56/2 = 28 .$$

Определение объема испытаний при неизвестном законе распределения случайной величины. Если вид закона распределения случайной величины неизвестен, то объем испытаний для всех планов, кроме планов $[NUT]$, $[NUr]$, $[NRT]$, $[NRr]$, $[NMT]$ и $[NMr]$, производится аналогично плану $[NUN]$. То есть объем испытаний принимают максимальным из значений, полученных по таблицам 6 и 8 [30] для распределений Вейбулла и логарифмически нормального.

5.4 Требования, предъявляемые к сбору и предварительной обработке информации

Исходная информация о надежности вагонов. Исходной для оценки показателей надежности является *экспериментальная информация* о наработках работоспособных и неработоспособных объектов или их составных частей, которая зависит от плана испытаний:

- при плане $[NUN]$ – выборочные значения наработки до отказа (t_1, t_2, \dots, t_N) и объем выборки N ;

- при планах $[NUr]$, $[NRr]$, $[NMr]$ – выборочные значения наработки до отказа (между отказами) (t_1, t_2, \dots, t_r) , число отказов r , объем выборки N ;
- при планах $[NUT]$, $[NRT]$, $[NMT]$ – выборочные значения наработки до отказа (между отказами) (t_1, t_2, \dots, t_d) , продолжительность испытаний T , число отказов r , объем выборки N , где t_i – отдельное значение случайной величины (как правило, наработки до отказа), составляющей выборку; t_N – наработка до отказа последнего из испытываемых изделий; t_r – наработка изделия до появления r заданных отказов; t_d – наработка изделия на момент окончания испытания (наблюдения).

Сбор информации о надежности вагонов. Сбор и обработка статистических информации о надежности (техническом состоянии) вагонов должны соответствовать одному из стандартных планов наблюдений. Источником информации являются данные реальной эксплуатации вагонов или различная техническая документация на ПТО, в депо и на заводе.

Получение статистических данных по отказам грузовых вагонов в эксплуатации существенно осложняется двумя факторами:

- 1) большой трудоемкостью проведения массовых наблюдений;
- 2) практической невозможностью наблюдения за каждым грузовым вагоном вследствие обезличенности его эксплуатации, которая не позволяет осуществлять наблюдения за определенной совокупностью вагонов в условиях их нормальной эксплуатации в течение достаточно продолжительного промежутка времени. В силу обезличенности эксплуатации грузовых вагонов необходимо осуществлять наблюдение одновременно за всем парком вагонов с помощью расположенных по всей сети железных дорог групп надежности. Однако сбор первичной информации по этому варианту не соответствует стандартным планам испытаний на надежность [33]. Этот недостаток можно устранить при сборе информации о вагонах, которые эксплуатируются в замкнутых маршрутах.

Первичную информацию о прочностных характеристиках конструкций получают с помощью стендовых и ударных испытаний. Первичную же информацию о нагруженности несущих элементов конструкций в условиях эксплуатационных динамических нагрузок получают с помощью проведения поездных ходовых испытаний. Первичную информацию можно получать также с помощью моделирования процессов эксплуатации вагонных конструкций.

Для сбора информации о техническом состоянии вагонов в РФ может быть использована *отраслевая система централизованного пономерного учета вагонов* ДИСКПАРК (автоматизированная система пономерного учета, контроля дислокации, регулирования вагонного парка). Эта системы позволяет осуществлять непрерывный контроль за текущим состоянием каж-

дого вагона. Все изменения технического состояния вагонов фиксируются в базе данных электронной картотеки вагонов по каждому номеру вагона, что позволяет *формировать массивы эксплуатационной информации по каждой детали списочного состава.*

Получаемая с линейных предприятий информация накапливается, сортируется и обрабатывается в ИВЦ и ГВЦ.

В результате функционирования системы ДИСКПАРК специалисты получают возможность анализировать эксплуатационные данные об отказах элементов конструкции вагонов.

В результате реализации плана испытаний на надежность получают *выборку* – упорядоченную во времени последовательность реализаций (выборочных значений) случайной величины (например, последовательность интервалов наработок вагона или его узла до отказа) –

$$t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_n, \quad (5.5)$$

где t_i – наработка вагона или его узла до i -го отказа.

Качество статистической информации определяется необходимым ее объемом, позволяющим определять оценки показателей надежности с заданной точностью и достоверностью. Поэтому наиболее объективные сведения о надежности изделий можно получить из статистических данных об отказах, полученных по результатам эксплуатации (испытаний) всей совокупности однотипных объектов. Эту совокупность называют *генеральной совокупностью*. Примером генеральной совокупности могут служить все однотипные буксовые узлы с подшипниками кассетного типа, изготовленные одним производителем и установленные на грузовые вагоны одного типа и модификации.

Как правило, в большинстве случаев невозможно получить сведения обо всех элементах множества генеральной совокупности. Поэтому для суждения о генеральной совокупности используется *случайная выборка* (выборочная совокупность), т. е. часть генеральной совокупности элементов, отобранная непреднамеренно случайным образом. Примером случайной выборки является выборка (5.5), полученная по результатам испытаний.

Отметим, что если суждение о генеральной совокупности основано на изучении выборки, то в результате обработки ее данных получают статистические оценки параметров генеральной совокупности. И чем больше объем выборки, тем меньше относительная ошибка между оценкой и действительным неизвестным параметром или показателем надежности.

Предварительная обработка данных выборки. Полученная выборка (5.5) должна быть подвергнута предварительной обработке в два этапа.

И т а п. *Исключение из выборки данных об отказах, обусловленных грубыми нарушениями* норм конструирования, технологии изготовления и правил эксплуатации вагонов [33].

Отсюда следует, что не все отказы вагонов и их узлов необходимо учитывать при оценке показателей их надежности. Рассмотрению подлежат лишь те *изделия*, которые спроектированы, изготовлены и используются по назначению при соблюдении соответствующих норм конструирования, технологии изготовления и правил эксплуатации, т.е. *спроектированы, изготовлены и эксплуатируются без «грубых» нарушений*.

Оставшиеся элементы выборки подвергают следующему этапу предварительной обработки.

И т а п. *Проверка выборки на выпадающие точки* (исключение из неоднородной выборки недостоверных элементов).

Как правило, данные, характеризующие техническое состояние новых моделей вагонов и вагонов эксплуатационного парка являются неоднородными.

Для *грубой проверки данных* выборки, вызывающих сомнения по поводу своей достоверности, используют правило $\bar{t} \pm 3s$, т. е. полученное расчетным путем среднее значение выборки \bar{t} последовательно уменьшают и увеличивают на $3s$. Если крайние точки информации не выходят за пределы $\bar{t} \pm 3s$, то все точки информации действительны.

П р и м е ч а н и е – Отметим, что в соответствии с неравенством Чебышева, не требующим каких-либо предположений о виде функции распределения, в границах интервала $[\bar{t} - 3s, \bar{t} + 3s]$ с вероятностью, большей 0,889, лежат все значения t_i случайной величины. Для нормального закона распределения эта вероятность составляет 0,997.

Более точная проверка данных выборки производится по критерию λ (критерию Ирвина). В этом случае проверяют крайние точки информации, а также любые смежные точки.

Фактическое значение критерия λ определяют по уравнению

$$\lambda_{\phi} = (t_i - t_{i-1}) / s, \quad (5.6)$$

где t_i, t_{i-1} – смежные точки выборки.

При выполнении условия $\lambda_{\phi} < \lambda_T$ точки выборки (первая и последняя) считаются достоверными, и они подлежат учету при дальнейших расчетах. В противном случае они считаются недостоверными и их исключают. Здесь λ_T – значение критерия (коэффициент) Ирвина. Теоретические значения критерия Ирвина λ_T приведены в таблице приложения В.

Если по результатам проверки получены выпадающие точки, то необходимо пересчитать среднее значение и среднее квадратическое отклонение.

Пример 5.7. Пусть минимальное и максимальное значения наработок в выборке $t_{\min} = 150$ тыс. км и $t_{\max} = 800$ тыс. км. Общее число точек в выборке $N = 50$. Среднее значение выборки составляет $\bar{t} = 420$ тыс. км, среднее квадратическое отклонение $s = 105$ тыс. км. Проверить выборку на выпадающие точки.

Р е ш е н и е.

1 Проверим выборку по правилу $\bar{t} \pm 3s$.

Верхняя и нижняя границы достоверности будут равны: $420 - 3 \cdot 105 = 105$ тыс. км и $420 + 3 \cdot 105 = 735$ тыс. км.

Минимальное значение выборки $t_{\min} = 150$ тыс. км превышает нижнюю границу интервала. Следовательно, эта точка информации должна быть учтена.

Наибольшее значение выборки $t_{\max} = 800$ тыс. км превышает верхнюю границу достоверности и поэтому должна быть исключена.

2 Проверим выборку по критерию Ирвина.

Фактические значения критерия для крайних точек выборки:

для наименьшей точки выборки ($t_1 = t_{\min} = 150$ тыс. км, $t_2 = 180$ тыс. км)

$$\lambda_{\phi} = (t_2 - t_1) / s = (180 - 150) / 105 = 0,29 ;$$

для наибольшей точки выборки ($t_{\max-1} = 650$ тыс. км, $t_{\max} = 800$ тыс. км)

$$\lambda_{\phi} = (t_{\max} - t_{\max-1}) / s = (800 - 650) / 105 = 1,43 .$$

Теоретическое значение критерия Ирвина для $N = 50$ равно 1,1 (см. приложение В).

Сравнение фактических значений критериев Ирвина с теоретическим свидетельствует о том, что первая точка выборки является достоверной ($\lambda_{\phi} = 0,29 < 1,1$), а последняя точка – недостоверной ($\lambda_{\phi} = 1,43 > 1,1$), и ее надо исключить. Учитывая, что последняя точка должна быть исключена, выполняем перерасчет значений \bar{t} и s .

5.5 Особенности статистической обработки информации

По данным эксплуатационных испытаний получают выборки наработок вагонов и их элементов. Результаты испытаний (наблюдений), «очищенные» предварительной обработкой, подлежат статистической обработке.

Статистическая обработка сводится к оценке параметров функций распределения случайных величин, определяющих показатели надежности, т.е. к традиционной задаче математической статистики

Для этапа статистической обработки наиболее существенными являются следующие факторы:

- типы оцениваемых показателей надежности;

- характер априорных сведений о наблюдаемой случайной величине (*a priori* – до опыта);

- типы получаемых выборок (характер статистического материала, получаемого в результате испытаний).

Типы определяемых (оцениваемых) показателей надежности. При экспериментальной оценке надежности определяются показатели d в у х т и п о в:

- *типа наработка* – средняя или γ -процентная (наработка до отказа, между отказами, до предельного состояния, срок сохраняемости, время восстановления и т.п.). Наблюдаемыми величинами в этом случае являются случайные интервалы.

- *типа вероятность* – вероятность безотказной работы, исправного состояния в произвольный момент, восстановления за заданное время и т.д. Наблюдаемыми величинами являются числа событий в испытаниях – число отказов, число восстановлений, число предельных состояний и т.д.

Характер априорных сведений о наблюдаемой случайной величине. Решение практических задач статистической обработки информации сводится к д в у м в а р и а н т а м, когда вид закона распределения наблюдаемой случайной величины:

- 1) известен априори;

- 2) неизвестен или известен предположительно.

В *первом случае* задача статистической обработки заключается в получении оценок (точечных и интервальных) для показателей надежности с учетом вида закона распределения, который нам известен, и имеющегося статистического материала (5.5).

Во *втором случае* по данным выборки (5.5) требуется идентифицировать семейство функций \tilde{f} , к которому принадлежит функция $F(t)$, и определить параметры функции. Последовательность решения задачи статистической обработки во втором случае:

- принять некоторую гипотезу о виде закона распределения;

- проверить, не противоречат ли экспериментальные данные принятой гипотезе;

- оценить параметры этого закона распределения.

Типы получаемых выборок. На характер статистического материала существенное влияние оказывает выбранный план испытаний. При любых планах испытаний получают только **т р и т и п а р е а л и з а ц и й с л у ч а й н ы х в е л и ч и н**, составляющих выборку:

- 1 *Полные реализации* – наработки до отказа.

- 2 *Неполные реализации* – безотказные наработки.

3 *Условные реализации* – наработки к моменту контроля, при котором обнаружен отказ (полные реализации при стратегиях с периодическим контролем, т.е. наработки до отказа в случае отсутствия непрерывного контроля).

Соответственно в процессе испытаний на безотказность могут быть получены два типа выборок: 1) полные и 2) усеченные (цензурированные). Последний тип выборок характерен для задач статистического оценивания надежности вагонных конструкций.

Полные выборки включают только полные или условные реализации случайной величины, когда каждый элемент выборки есть наработка до отказа или наработка к моменту контроля, когда обнаружен отказ.

Усеченные выборки – выборки, имеющие в своем составе полные (или условные) и неполные реализации, или, иначе, выборки, содержащие как наработки до отказа, так и безотказные наработки.

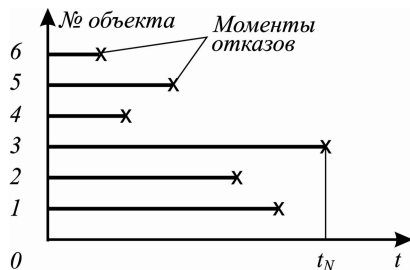
Усеченные выборки получают в результате усечения выборки по времени (например, планы испытаний $[NUT]$ или $[NRT]$). Они содержат d полных или условных реализаций, значения которых не превышают длительности испытаний T , и c неполных реализаций, где $d = N - c$; N – общее число реализаций в выборке (полных и неполных).

Получение полных и усеченных выборок возможно при планах с непрерывным и периодическим контролем.

Результаты любого испытания на надежность могут быть представлены графически *схемой процесса испытаний и диаграммой реализаций*, которые наглядно и однозначно отражает специфику получаемого статистического материала.

Получение полных выборок при использовании плана испытаний $[NUN]$. Результаты испытания на надежность при осуществлении непрерывного контроля для плана $[NUN]$ показаны на схеме (рисунок 5.2).

Рисунок 5.2 – Схема процесса испытаний с непрерывным контролем по плану $[NUN]$



При использовании плана $[NUN]$ с непрерывным контролем отказы обнаруживаются в момент их появления и испытания (наблюдения) продолжают до выхода из строя всех объектов. При плане $[NUN]$ результаты испытаний содержат только полные реализации, причем *момент последнего*

отказа является моментом окончания испытаний. Выборка, получаемая при этом, является примером экспериментальных данных классического типа – «полная выборка».

В общем случае полные выборки адекватны планам испытаний $[NUN]$, $[NRN]$, $[1Rr]$, $[1Mr]$.

Результаты испытания на надежность при осуществлении периодического контроля для плана $[NUN]$ показаны на схеме процесса испытаний и соответствующей ей диаграмме реализаций (рисунок 5.3). *Диаграмма реализаций есть графическое представление выборки* в виде соответствующего набора реализаций.

При использовании плана $[NUN]$ с периодическим контролем условия эксперимента не позволяют выявить отказы в момент их появления. В этом случае получаемые экспериментальные данные содержат только условные реализации, значения которых определяются наработкой к моменту контроля, при котором обнаружен отказ. В этом случае полные выборки адекватны планам испытаний $[NUN]$.

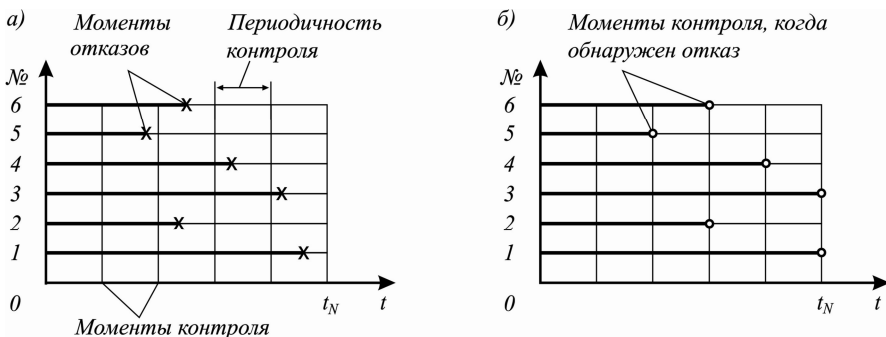


Рисунок 5.3 – Схема процесса испытаний и диаграмма реализаций с периодическим контролем по плану $[NUN]$:

a – схема процесса испытаний; b – диаграмма реализаций

При получении полных выборок проблем с решением задач по оценке показателей надежности, как правило, не существует. Данные реальных эксплуатационных наблюдений за совокупностью вагонов, как правило, нельзя привести к этому типу выборки.

Получение однократно усеченных выборок при использовании плана испытаний $[NUT]$. Результаты испытания на надежность для плана NUT при осуществлении непрерывного контроля показаны на схеме (рисунок 5.4), периодического – на схеме и диаграмме реализаций (рисунок 5.5).

Рисунок 5.4 – Схема процесса испытаний с непрерывным контролем по плану [NUT]

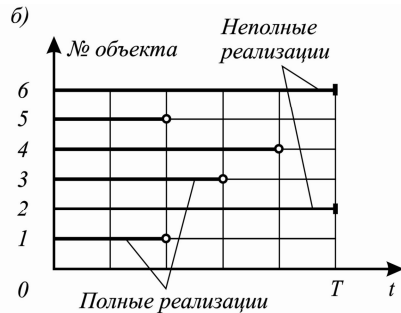
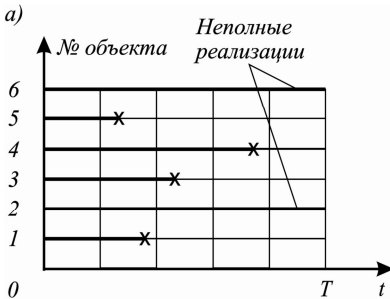
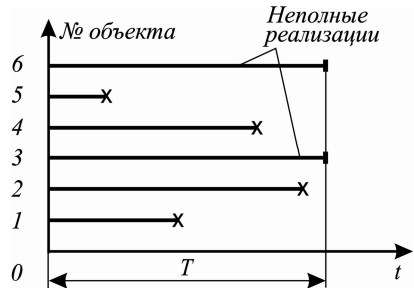


Рисунок 5.5 – Схема процесса испытаний и диаграмма реализаций с периодическим контролем по плану [NUT]:
 а – схема процесса испытаний; б – диаграмма реализаций

При использовании плана с непрерывным контролем получают однократно усеченные выборки – выборки, которые содержат полные реализации и одинаковые неполные реализации.

Как следует из схемы на рисунке 5.4, в результате испытаний три объекта отказали ($N_1 = 3$). Следовательно, выборка содержит три полные реализации, значения которых не превышают длительности испытаний T и две ($N - N_1$) одинаковые неполные реализации.

При использовании стратегии с периодическим контролем получают выборки, основная особенность которых состоит в том, что они содержат условные и неполные реализации. Значения условных реализаций определяются наработкой к моменту контроля, при котором обнаружен отказ. Значения неполных реализаций определяются безотказной наработкой каждого из испытываемых изделий к моменту последнего контроля.

Поскольку при периодическом контроле непосредственно зафиксировать момент очередного отказа невозможно, то невозможны, строго говоря,

и стратегии с фиксированным числом отказов. Они сводятся в данном случае к стратегиям с фиксированной наработкой.

Получение многократно усеченных выборок при использовании плана испытаний [NRT]. Результаты испытания на надежность для плана NRT при осуществлении непрерывного контроля показаны на схеме (рисунок 5.6), периодического – на схеме и диаграмме реализаций (рисунок 5.7).

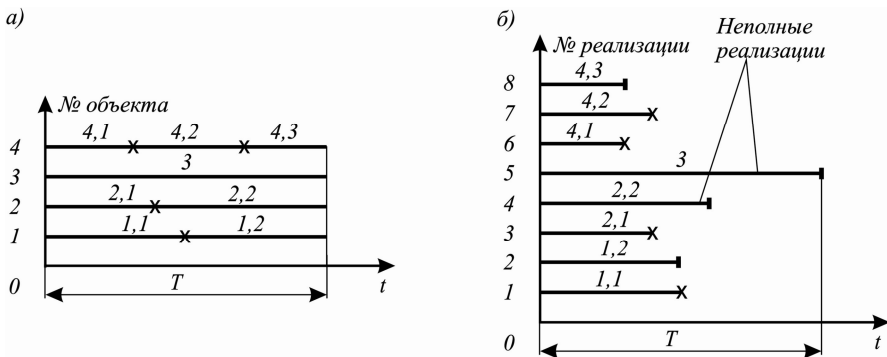


Рисунок 5.6 – Схема процесса испытаний и диаграмма реализаций с непрерывным контролем по плану [NRT]:

а – схема процесса испытаний; б – диаграмма реализаций

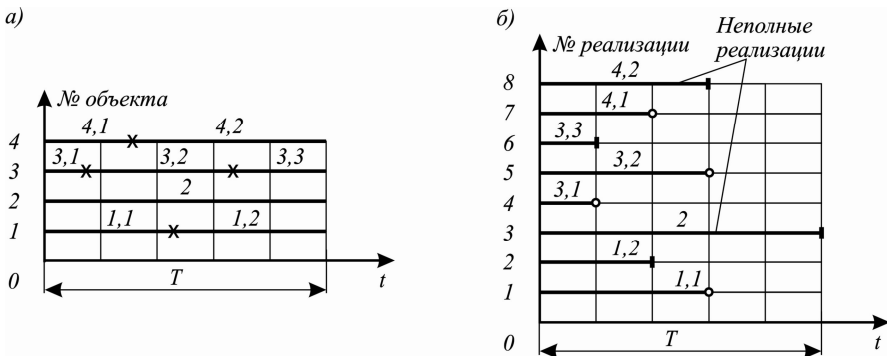


Рисунок 5.7 – Схема процесса испытаний и диаграмма реализаций с периодическим контролем по плану [NRT]:

а – схема процесса испытаний; б – диаграмма реализаций

При использовании плана $[NRT]$ с непрерывным и периодическим контролем получают многократно усеченные выборки – выборки, которые содержат полные (или условные) реализации и различные по величине неполные реализации. Многократно усеченные выборки, соответствующие планам $[NUT]$, $[NUTr]$, $[NRT]$, $[NRr]$, характерны для задач статистического оценивания надежности вагонных конструкций. При этом контроль технического состояния вагонов осуществляется не непрерывно, а в дискретные моменты времени на ПТО, ППВ и при поступлении вагонов в плановые ремонты.

5.6 Оценка показателей надежности (статистическая обработка информации)

5.6.1 Общие требования. Методы оценки показателей надежности

Под **оценками показателей надежности** понимают оценки показателей (точечных или интервальных), определяемых по результатам наблюдений за вагонами в условиях эксплуатации. Интервальная оценка показателя предполагает определение границы доверительного интервала, который с заданной вероятностью содержит истинное значение показателя.

Оценка показателей надежности вагонов по экспериментальным данным регламентируется руководящим документом РД 50-690–89 и производится двумя методами:

- параметрическим – при известном законе распределения;
- непараметрическим – при неизвестном законе распределения.

Параметрический метод предполагает:

- 1) оценку параметров закона распределения, входящих в расчетную формулу определяемого показателя надежности;
- 2) оценку показателя надежности по вычисленным оценкам параметров закона распределения.

Параметрические методы оценки показателей надежности, установленные РД 50-690–89, применяют для экспоненциального, нормального, логарифмически-нормального распределений и распределения Вейбулла.

Непараметрический метод включает непосредственную оценку показателей надежности.

Оценки показателей надежности используют при количественном анализе надежности и (или) при контроле показателей надежности с помощью доверительных границ по ГОСТ 27.410.

Как отмечалось выше, показатели надежности в случае известного закона распределения определяются оценками параметров этих законов. Поэтому ниже рассмотрим определение оценок параметров распределений.

5.6.2 Доверительные границы рассеивания точечных значений показателей надежности при известном законе распределения

Для оценки показателей надежности – среднего значения (математического ожидания), среднего квадратического отклонения, коэффициента вариации и др. – используется в ы б о р о ч н ы й м е т о д. Сущность метода состоит в том, что испытывают не всю совокупность определенных типов вагонов (*генеральную совокупность*), а только некоторую ее выборочную часть (выборку). Выборка должна быть *случайной*, т. е. состоять из однородных объектов, отобранных случайным образом, и *репрезентативной (представительной)*. По информации, полученной при испытании случайной выборки объектов, можно на основе статистических методов сделать достаточно обоснованные выводы относительно показателей надежности всех объектов генеральной совокупности с указанием степени достоверности.

Таким образом, генеральную совокупность однородных объектов изучают выборочным методом, т. е. суждение о генеральной совокупности основано на изучении выборки. На основе обработки данных случайной выборки определенного типа вагонов получают *статистические оценки параметров распределений (показателей надежности)*, которые затем должны быть перенесены на другие группы генеральной совокупности вагонов рассматриваемого типа.

Очевидно, что изменение количества вагонов в выборке и условий их эксплуатации вызовет изменение количественных характеристик показателей надежности. Несмотря на то, что эти изменения носят случайный характер, они происходят в определенных границах, т. е. в определенном интервале. Величина этого интервала зависит от многих факторов и прежде всего от числа вагонов в выборке.

Как известно, статистические оценки приближаются к истинным значениям по мере увеличения объема выборки. Очевидно, что статистическая оценка параметра, полученная для выборки достаточно большого объема, будет находиться вблизи от истинного значения этого параметра, справа или слева от нее, т. е. внутри определенного интервала.

Вычисление границ рассеивания количественных характеристик показателей надежности, а следовательно, и определение возможной ошибки их переноса из одних условий в другие является важной задачей теории надежности.

Определение доверительных границ рассеивания одиночного значения показателя надежности. Если по результатам испытания N объектов получено среднее значение показателя надежности \hat{m}_i , то, как отмечалось выше, *одиночное значение этого же показателя у конкретного вагона* может отличаться от \hat{m}_i на величину $\pm 3s$ для нормального распределения и на

величину от $0,1a$ до $2,5a$ – для распределения Вейбулла, где a – параметр распределения.

Отметим, что площадь под дифференциальной кривой в интервале от t_1 до t_2 называется *площадью охвата* q . Для нормального распределения площадь охвата, ограниченная интервалом $\pm 3s$, составляет 0,997 или 99,7%. Это означает, что в 997 случаях из 1000 значение одиночного показателя надежности будет находиться в интервале значений от $\hat{m}_t - 3s$ до $\hat{m}_t + 3s$. Такая высокая степень доверия расчета, охватывающая 99,7% всех возможных вариантов, является излишней при определении показателей надежности вагонов и их составных частей. Задавая меньшие значения площади охвата q , сближают соответственно границы рассеивания одиночного показателя надежности. При этом, с одной стороны, уменьшается возможная погрешность расчета, а с другой, снижается степень доверия.

Между площадью охвата q и соответствующим ей интервалом рассеивания существует функциональная связь, которая, например для нормального закона, представлена уравнениями (3.16) или (3.22). При этом значения функций $F_0(x)$ и $\Phi(x)$ табулированы (см. приложения А и Б). Так, если задаться $q = 0,90$, то справа от среднего значения \hat{m}_t разместится по 0,45 площади. Следовательно, для нормированных функций $F_0(x)$ и $\Phi(x)$ их значения будут равны 0,95 ($0,50 + 0,45$) и 0,45 соответственно. Затем вычисляют количество t_q средних квадратических отклонений s , которые необходимо отложить влево и вправо от среднего значения \hat{m}_t .

Для указанных значений нормированных функций $t_q = 1,64$. Следовательно, границы интервала рассеивания одиночного показателя надежности при $q = 0,90$ $\hat{m}_t = \pm 1,64s$, т. е. влево и вправо от \hat{m}_t нужно отложить величину $1,64s$. При уменьшении площади охвата до значения $q = 0,80$ $t_q = 1,28$, т. е. интервал рассеивания показателя надежности уменьшится и составит $\hat{m}_t = \pm 1,28s$.

Итак, площадь охвата q равна в долях единицы (или в процентах) количеству одиночных показателей надежности, числовые значения которых попадают в границы соответствующего этой площади интервала.

Отметим, что площадь охвата q характеризует вероятность попадания показателя надежности в соответствующий интервал его значений и степень достоверности расчета. Поэтому она называется *доверительной вероятностью* q .

Интервал, в который при заданной доверительной вероятности q укладывается $(100q)\%$ от числа объектов N , называется *доверительным интервалом* J_q .

Границы, в которых может изменяться значение одиночного показателя надежности при заданной доверительной вероятностью q , называется *нижней и верхней доверительными границами* t_q^H и t_q^B .

На рисунке 5.8 [31] показана взаимосвязь между доверительной вероятностью q , величинами доверительных границ и возможной наибольшей ошибкой e_q для нормального распределения.

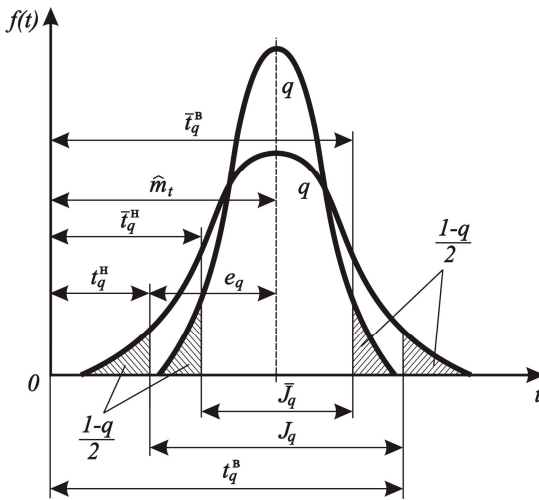


Рисунок 5.8 – Двусторонние доверительные границы рассеивания одиночного t и среднего \hat{m}_t значений показателя надежности

При $N < 25$ для определения t_q (количества s) следует пользоваться законом распределения Стьюдента. Для этого закона приводятся табулированные значения t_q при небольшом объеме выборки.

Уравнения для определения доверительного интервала I_q , доверительных границ t_q^H и t_q^B и абсолютной ошибки e_q для одиночного показателя надежности при нормальном законе распределения, выглядят следующим образом:

$$e_q = t_q s ; \quad t_q^H = \hat{m}_t - t_q s ; \quad t_q^B = \hat{m}_t + t_q s ; \quad J_q = t_q^B - t_q^H .$$

Анализ приведенных уравнений свидетельствует о том, что увеличение доверительной вероятностью q или уменьшение степени доверия расчета приводит к увеличению возможной ошибки расчета e_q и расширению доверительного интервала J_q .

Как отмечалось выше, доверительную вероятность q рекомендуется выбирать из ряда: 0,80; 0,90; 0,95; 0,99.

Определение доверительных границ рассеивания среднего значения показателя надежности. В практических расчетах более часто приходится встречаться с расчетом доверительных границ среднего значения показателя надежности \hat{m}_t . Особенностью расчета является различие в определении величины среднего квадратического отклонения показателя надежности.

П р и м е ч а н и е – Если взять несколько выборок размером N из одной и той же генеральной совокупности объектов, то для каждой из них будут получены различные значения \hat{m}_t и s . Естественно, что полученные оценки \hat{m}_t будут определенным образом распределены относительно истинного значения m_t генеральной совокупности, а оценки s – относительно своего истинного значения.

Взаимосвязь между величинами среднего квадратического отклонения для одиночного и среднего значений показателей надежности установлена в теории вероятностей и имеет вид

$$s_{m_t} = s/\sqrt{N}.$$

Расчетные уравнения для определения рассеивания среднего значения показателя надежности при нормальном распределении будут аналогичны соответствующим уравнениям для одиночного значения показателя надежности, т. е.

$$e_q = t_q \frac{s}{\sqrt{N}}; \quad \bar{t}_q^H = \hat{m}_t - t_q \frac{s}{\sqrt{N}};$$

$$\bar{t}_q^B = \hat{m}_t + t_q \frac{s}{\sqrt{N}}; \quad \bar{J}_q = \bar{t}_q^B - \bar{t}_q^H.$$

5.6.3 Определение точечных оценок параметров распределений при известном законе распределения

Методы определения точечных оценок параметров распределений.

В случае, когда известен закон распределения (функция распределения), которому подчиняется выборка (5.5), задача статистической обработки информации, полученной в результате наблюдения за работой объектов, заключается в получении точечных оценок параметров Q_i этого закона.

Точечную оценку параметра Q_i обозначают \hat{Q}_i . Она должна быть близка к параметру Q_i .

Критериями качества точечных оценок \hat{Q}_i являются (иначе, на оценку \hat{Q}_i накладываются три требования) состоятельность, несмещенность и эффективность.

Оценка параметра считается состоятельной, если она сходится (по вероятности) к истинному значению оцениваемого параметра с увеличением объема выборки.

Оценка параметра называется несмещенной, если ее математическое ожидание равно истинному значению оцениваемого параметра. Несмещенность означает отсутствие систематической ошибки.

Оценка параметра считается эффективной, если она имеет наименьшую дисперсию по сравнению с любыми другими оценками.

Естественно, что лучшей является состоятельная, несмещенная и эффективная оценка, т. е. оценка соответствующая всем трем критериям. Однако такие оценки могут быть получены не для всех статистических данных. Поэтому выбор метода оценки во многих случаях диктуется не соображениями ее качества, а характером полученного статистического материала.

Для получения точечных оценок параметров распределений и показателей надежности существует достаточно большое количество методов – метод моментов, метод максимального правдоподобия, метод квантилей и др.

Метод моментов. *Сущность метода* состоит в том, что моменты теоретического распределения – начальные m_k или центральные μ_k , зависящие от неизвестных параметров, приравниваются к эмпирическим моментам, т. е.

$$m_k = \widehat{m}_k; \quad \mu_k = \widehat{\mu}_k. \quad (5.7)$$

Эмпирический момент k-го порядка:

начальный –

$$\widehat{m}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^k; \quad (5.8)$$

центральный –

$$\widehat{\mu}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \widehat{m}_1)^k, \quad (5.9)$$

где t_i – зафиксированные при испытаниях наработки между отказами (полные реализации);

\widehat{m}_1 – выборочное среднее значение случайной величины (эмпирический начальный момент первого порядка);

n – объем выборки (число полных реализаций).

Взяв число моментов равным числу неизвестных параметров, получаем необходимое число уравнений.

Использование метода моментов основано на том, что если число отказов n достаточно велико, то в силу закона больших чисел значения эмпирических моментов близки к теоретическим.

Пример 5.8. Пусть наработка до отказа какой-либо детали описывается нормальным распределением, плотность вероятности которого

$$f(t) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-a)^2}{2s^2}\right]. \quad (5.10)$$

Оценке подлежат параметры распределения: a (математическое ожидание) и s (среднее квадратическое отклонение).

Решение.

Как известно, теоретический начальный момент первого порядка представляет собой математическое ожидание случайной величины, а центральный момент второго порядка – дисперсию, т.е.

$$m_1 = a; \quad \mu_2 = s^2. \quad (5.11)$$

Эмпирический начальный момент первого порядка (выборочное среднее значение)

$$\widehat{m}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \quad (5.12)$$

второго порядка (выборочная дисперсия) –

$$\widehat{\mu}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \widehat{m}_1)^2, \quad (5.13)$$

где t_i – отдельные значения случайной величины (наработки до отказа).

Заменяв теоретические моменты эмпирическими, получим: $\widehat{a} = \widehat{m}_1; \quad \widehat{s}^2 = \widehat{\mu}_2$.

Пример 5.9. Нарботка до отказа узла вагона описывается двухпараметрическим распределением Вейбулла, плотность вероятности которого $f(t)$ определяется формулой (3.37). Вычислить оценки параметров a и b распределения.

Решение.

Первый и второй начальные моменты распределения определяются выражениями [22]

$$m_1 = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad m_2 = a^2 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right), \quad (5.14)$$

где $\Gamma(\dots)$ – гамма-функция, значения которой табулированы.

Тогда для нахождения оценок a и b параметров распределения Вейбулла можно с учетом (5.8) составить следующие два уравнения:

$$\hat{a} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}; \quad \hat{a}^2 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2}{n}. \quad (5.15)$$

Метод моментов весьма прост в реализации. Однако получаемые этим методом оценки неэффективны и, следовательно, могут быть использованы только *при объемах выборки не менее 30*.

При применении метода моментов к *усеченной выборке* для оценки параметров *используются только полные реализации*, что, очевидно, приводит к систематической ошибке (занижению) оценок относительно истинного значения параметра.

Метод максимального правдоподобия. Метод является универсальным и наиболее мощным с точки зрения эффективности оценок.

Идея метода заключается в том, что для фиксированного результата эксперимента составляется функция правдоподобия L , выражающая вероятность получить реализовавшийся в эксперименте результат. В качестве искомого точечных оценок принимаются значения параметров, максимизирующих функцию правдоподобия.

Оценки параметров Q_1, Q_2, \dots, Q_k функции распределения $F(t)$ при использовании метода максимального правдоподобия определяют из решения k уравнений

$$\frac{\partial L}{\partial Q_i} = 0, \quad (i = \overline{1, k}), \quad (5.16)$$

где L – функция правдоподобия.

Вместо максимума функции L для упрощения операции дифференцирования удобнее искать максимум функции $\ln L$, так как в этом случае экстремум достигается при тех же значениях параметров Q_i . Тогда можно записать:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial Q_i} = 0, \quad (5.17)$$

где $\ln L$ – логарифм функции правдоподобия,

Функция правдоподобия для полной выборки (при наличии в выборке из n элементов только наработок до отказа) имеет вид

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i), \quad (5.18)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки изделия до отказа.

З а м е ч а н и е – Поясним получение формулы (5.18) [34].

Пусть имеется выборка t_1, t_2, \dots, t_n из генеральной совокупности, генеральные характеристики которой (например, Q_1 и Q_2) неизвестны.

Плотность вероятности случайной величины t будет $f(t)$. В эту функцию в качестве параметров входят указанные генеральные характеристики Q_1 и Q_2 , т. е. можно записать $f(t, Q_1, Q_2)$.

Вероятность получения выборки t_1, t_2, \dots, t_n или, точнее, вероятность получения выборки в границах от t_1 до $t_1 + \Delta t_1$ – для первого члена, от t_2 до $t_2 + \Delta t_2$ – для второго члена, ..., от t_n до $t_n + \Delta t_n$ – для n -го члена – будет равна

$$p = f(t_1)f(t_2)\dots f(t_n)\Delta t_1 \Delta t_2 \dots \Delta t_n. \quad (1)$$

В правую часть полученного уравнения входят неизвестные параметры Q_1 и Q_2 .

Если известна аналитическая форма закона распределения $f(t)$, а его параметры Q_1 и Q_2 неизвестны, то эти параметры следует определять из условия (1) так, чтобы получить максимум вероятности p . Действительно, выборка t_1, t_2, \dots, t_n была получена в результате испытаний, и поэтому наиболее вероятны такие значения Q_1 и Q_2 , при которых вероятность p максимальна.

Рассмотрим функцию

$$L = \frac{p}{\Delta t_1 \Delta t_2 \dots \Delta t_n} = \sum_{i=1}^n f(t_i).$$

Эта функция называется функцией правдоподобия. Очевидно, что при тех значениях Q_1 и Q_2 , при которых вероятность p максимальна, будет иметь место максимум и функции L .

Более удобно выполнять расчет, используя логарифм функции правдоподобия, т. е.

$$\ln L = \ln \frac{p}{\Delta t_1 \Delta t_2 \dots \Delta t_n} = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i).$$

Для определения оценок параметров Q_1 и Q_2 составят два уравнения (по числу параметров): $\partial \ln L / \partial Q_1 = 0$ и $\partial \ln L / \partial Q_2 = 0$.

Функция правдоподобия для усеченной выборки (при наличии в выборке d наработок до отказа и c безотказных наработок):

однократно усеченной –

$$\ln L = \sum_{i=1}^d \ln f(t_i) + c \ln [1 - F(T)]; \quad (5.19)$$

многократно усеченной –

$$\ln L = \sum_{i=1}^d \ln f(t_i) + \sum_{j=1}^c \ln[1 - F(\tau_j)], \quad (5.20)$$

где $F(\tau)$ – функция распределения безотказной наработки: для однократно усеченной выборки $\tau_j = T$ и, следовательно, $F(\tau_j) = F(T)$;

T – установленная наработка до конца испытаний или календарная продолжительность испытаний;

c – число безотказных наработок, $c = n - d$.

З а м е ч а н и е – В случае однократно усеченной выборки уравнение (1), приведенное в предыдущем замечании, для определения вероятности p , полученное для полной выборки, примет вид

$$p = f(t_1) f(t_2) \dots f(t_n) \Delta t_1 \Delta t_2 \dots \Delta t_n [1 - F(T)]^c.$$

При этом функция правдоподобия будет равна

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i) + c \ln[1 - F(T)],$$

где $F(T)$ – функция распределения для $t = T$.

Первое слагаемое функции $\ln L$ учитывает полные реализации; второе слагаемое – неполные реализации.

Метод максимального правдоподобия наилучшим образом использует всю информацию, содержащуюся в экспериментальных данных (отказные и безотказные наработки). В то же время в ряде случаев получение оценок связано с необходимостью решения громоздких уравнений.

Пример 5.10. В результате испытаний по плану $[NRN]$ получена выборка, элементы которой распределены по нормальному закону. Оценить параметры a и s распределения.

Р е ш е н и е.

Плотность вероятности нормального распределения определяется формулой (5.10), а соответствующая ей функция правдоподобия будет иметь вид

$$\begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^n f(t_i) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_i - a)^2}{2s^2}\right] = \\ &= \frac{1}{(s\sqrt{2\pi})^n} \exp\left[\sum_{i=1}^n \left[-\frac{1}{2s^2}(t_i - a)^2\right]\right]. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Тогда логарифм функция правдоподобия

$$\ln L = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln s^2 - \frac{1}{2s^2} \sum_{i=1}^n (t_i - a)^2. \quad (5.22)$$

Взяв частные производные $\ln L$ по a ($\partial \ln L / \partial a = 0$) и s ($\partial \ln L / \partial s = 0$), получим уравнения

$$\frac{1}{s^2} \sum_{i=1}^n (t_i - a) = 0; \quad (5.23)$$

$$-\frac{n}{2s^2} + \frac{1}{2s^2} \sum_{i=1}^n (t_i - a)^2 = 0. \quad (5.24)$$

Решая систему этих уравнений, получим соотношения для вычисления оценок a и s :

$$\hat{a} = \bar{t}; \quad \hat{s}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 = \sigma^2. \quad (5.25)$$

Пример 5.11. В результате испытаний по плану $[NRT]$ получена многократно усеченная выборка, содержащая d наработок до отказа (полных реализаций t_i) и c различных безотказных наработок (неполных реализаций τ_j). Предполагается, что наработка на отказ испытываемых изделий подчиняется распределению Вейбулла с функциями $f(t)$ и $F(t)$, значения которых определяются уравнениями (3.17) и (3.18).

Вычислить оценки параметров a и b распределения.

Решение.

Логарифм функции правдоподобия определяем, используя уравнение (5.20), которое для распределения Вейбулла будет иметь вид

$$\ln L = d \ln b - db \ln a + (b-1) \sum_{i=1}^d \ln t_i - a^{-b} \left(\sum_{i=1}^d t_i^b + \sum_{j=1}^c \tau_j^b \right). \quad (5.26)$$

Для получения оценок параметров используются уравнения:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \ln L}{\partial b} = 0. \quad (5.27)$$

Решая систему двух уравнений (дифференцируя и выполняя алгебраические преобразования), находим соотношения для вычисления оценок a и b :

$$\hat{a} = \left[\left(\sum_{i=1}^d t_i^{\hat{b}} + \sum_{j=1}^c \tau_j^{\hat{b}} \right) / d \right]^{1/\hat{b}}; \quad (5.28)$$

$$1 + \frac{b}{d} \sum_{i=1}^d \ln t_i = \frac{\widehat{b} \left(\sum_{i=1}^d t_i^{\widehat{b}} \ln t_i + \sum_{j=1}^c \tau_j^{\widehat{b}} \ln \tau_j \right)}{\sum_{i=1}^d t_i^{\widehat{b}} + \sum_{j=1}^c \tau_j^{\widehat{b}}}. \quad (5.29)$$

Уравнение (5.29) решается методом последовательных приближений. Порядок решения уравнений указанным методом приведен в приложении И). При этом в качестве первого приближения для оценки \widehat{b} можно принять значение, получаемое методом моментов или графическим методом. После определения \widehat{b} из (5.28) находится значение \widehat{a} .

Метод квантилей. Сущность метода состоит в том, что квантили теоретического распределения приравняется к эмпирической квантили. При этом используется столько эмпирических квантилей и соответственно уравнений, сколько параметров необходимо оценить. Например [22], для оценок параметров a и b распределения Вейбулла используются следующие два уравнения:

$$1 - \exp \left[- \left(\frac{t_1}{\widehat{a}} \right)^{\widehat{b}} \right] = \widehat{F}_1; \quad (5.30)$$

$$1 - \exp \left[- \left(\frac{t_2}{\widehat{a}} \right)^{\widehat{b}} \right] = \widehat{F}_2, \quad (5.31)$$

где t_1, t_2 – квантили эмпирической функции распределения (выбранные значения наработок);

$\widehat{F}_1, \widehat{F}_2$ – значения эмпирической функция распределения (частоты), соответствующие квантилям t_1 и t_2 ,

$$\widehat{F}_1 = m_1/n, \quad \widehat{F}_2 = m_2/n;$$

m_1, m_2 – число отказов для наработки t_1 и t_2 ;

n – объем выборки.

Таким образом, в рассматриваемом примере сопоставляются две теоретических и две эмпирических вероятности, соответствующие выбранным квантилям (наработкам) t_1 и t_2 ($t_1 < t_2$).

Решая уравнения (5.28) и (5.29) относительно значений \widehat{a} и \widehat{b} , получают соответствующие формулы для оценок:

$$\hat{b} = \frac{\ln \ln F_2 - \ln \ln F_1}{\ln(t_2/t_1)} ; \quad \hat{a} = \frac{t_1}{(-\ln F_1)^{1/\hat{b}}} . \quad (5.32)$$

Метод квантилей более универсален относительно типа выборки. Однако оценки, получаемые методом квантилей, обладают значительной дисперсией. Достоверность оценок, получаемых любым из перечисленных аналитических методов, существенно зависит от достоверности сведений о виде функции распределения исследуемой случайной величины. Поэтому даже когда вид функции распределения считается априори известным, рекомендуется, прежде чем использовать какой-либо из методов для точечных оценок параметров, провести проверку согласия опытного распределения с теоретическим (априори заданным) по вероятностной бумаге.

Примечание – Вероятностная бумага – специальным образом разграфленная бумага, построенная так, что график функции конкретного распределения (нормального, Вейбулла и др.) изображается на ней прямой линией. Вероятностная бумага позволяет быстро проверить гипотезу о соответствии эмпирической функции распределения конкретному теоретическому распределению.

Точечные оценки параметров основных распределений. Точечную оценку параметров экспоненциального распределения, распределения Вейбулла и нормального распределения вычисляют по формулам, приведенным в приложениях Е, Ж и И соответственно.

Рассмотрим примеры определения точечных оценок параметров распределений.

Пример 5.12. По результатам испытаний 20 изделий по плану [NUT] за период $T = 140$ тыс. км получена однократно усеченная выборка, включающая:

5 значений наработок до отказа t_i (тыс. км): 28, 52, 68, 72, 112;

15 значений безотказных наработок (наработок до цезурирования).

Известно, что наработка до отказа подчиняется распределению Вейбулла.

Определить точечные оценки параметров a и b распределения.

Решение.

Для оценки параметров используем метод последовательных приближений, расчетные формулы которого приведены в приложении Ж. Тогда, для $N = 20$, $m = 5$, $n = 15$, $\tau_j = T = 140$ тыс. км, $t_m = 112$ тыс. км и $\epsilon = 0,01$

$$A = \frac{3,3322 + 3,9512 + 4,2194 + 4,2766 + 4,7185}{5} = 4,1 ;$$

$$\hat{b}_0 = \frac{5+1}{[4,1 - 3,3322](0,23 \cdot 5 + 3,71)} = 1,609 ;$$

$$\widehat{b}_1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^5 \ln t_i t_i^{1,609} + 15 \cdot (\ln 140 \cdot 140^{1,609})}{\sum_{i=1}^5 t_i^{1,609} + 15 \cdot 140^{1,609}} - 4,1 \right)^{-1} = 1,272.$$

Проверяем, достигнута ли требуемая точность:

$$\left| \frac{\widehat{b}_1 - \widehat{b}_0}{\widehat{b}_0} \right| = \left| \frac{1,272 - 1,609}{1,609} \right| = 0,209 > \varepsilon = 0,01.$$

Аналогично вычисляем $\widehat{b}_2 = 1,299$ и $\widehat{b}_3 = 1,297$.

Так как

$$\left| \frac{\widehat{b}_3 - \widehat{b}_2}{\widehat{b}_2} \right| = \left| \frac{1,297 - 1,299}{1,299} \right| = 0,002 < \varepsilon = 0,01, \text{ то в качестве оценки пара-}$$

метра b принимаем $\widehat{b} = \widehat{b}_3 = 1,297$.

Вычисляем оценку параметра a по формуле (Ж.2)

$$\widehat{a} = \left\{ \left[\sum_{i=1}^5 t_i^{1,297} + (20 - 15) \cdot 112^{1,297} \right] / 5 \right\}^{1/1,297} = 295,879.$$

Пример 5.13. По результатам испытаний 20 изделий по плану $[NUT]$ получена выборка, элементы которой подчиняются нормальному распределению. Данные выборки соответствуют предыдущему примеру.

Определить точечные оценки параметров μ и s распределения методом последовательных приближений.

Р е ш е н и е.

Имеем $N = 20$, $m = 5$, $n = 15$ и $t_m = 112$ тыс. км.

Коэффициенты составят:

$$A = \sum_{i=1}^m t_i + 0,64(N - m)t_m = \sum_{i=1}^5 t_i + 0,64(20 - 5) \cdot 112 = 1,407 \cdot 10^3;$$

$$B = m + 0,64(N - m) = 5 + 0,64(20 - 5) = 14,6;$$

$$C = \sum_{i=1}^m t_i^2 + 0,64(N - m)t_m^2 = \sum_{i=1}^5 t_i^2 + 0,64(20 - 5) \cdot 112^2 = 1,463 \cdot 10^5;$$

$$D = 0,8(N - m) = 0,8(20 - 5) = 12;$$

$$E = 0,8(N - m)t_m = 0,8(20 - 5) \cdot 112 = 1,344 \cdot 10^3.$$

Начальные приближения $\hat{\mu}_0$ и \hat{s}_0 будут:

$$\hat{s}_0 = \frac{1,344 \cdot 10^3 - 1,407 \cdot 10^3 \left(\frac{12}{14,6} \right)}{2 \cdot 5} + \sqrt{\frac{\left(1,344 \cdot 10^3 - 1,407 \cdot 10^3 \frac{12}{14,6} \right)^2 + 4 \cdot 5 \left(1,463 \cdot 10^4 - \frac{(1,407 \cdot 10^3)^2}{14,6} \right)}{2 \cdot 5}} = 68,51.$$

$$\hat{\mu}_0 = \frac{A}{B} + \frac{D}{B} \hat{s}_0 = \frac{1,407 \cdot 10^3}{14,6} + \frac{12}{14,6} \cdot 68,51 = 152,7.$$

Для вычисления первого приближения $\hat{\mu}_1$ и \hat{s}_1 , определяем значения коэффициентов:

$$d_1 = (t_m - \hat{\mu}_0) / \hat{s}_0 = (112 - 152,7) / 68,51 = -0,594;$$

$$\varphi(d_1) = \varphi(-0,594) = 0,335;$$

$$F_0(d_1) = F_0(-0,594) = 1 - F_0(0,594) = 1 - 0,722 = 0,278;$$

$$\lambda_1 = \varphi(d_1) / [1 - F_0(d_1)] = 0,335 / [1 - 0,278] = 0,464;$$

$$\Delta'_1 = \lambda_1 - 0,8 - 0,64d_1 = 0,464 - 0,8 - 0,64 \cdot (-0,594) = 0,044;$$

$$\Delta_1 = (N - m) \Delta'_1 = (20 - 5) \cdot 0,044 = 0,6624;$$

$$F_1 = (N - m) \Delta'_1 t_m = (20 - 5) \cdot 0,044 \cdot 112 = 74,188.$$

После подстановки коэффициентов в формулу (И.3) получим первое приближение $\hat{\mu}_1$ и \hat{s}_1 :

$$\hat{s}_1 = 69,955; \quad \hat{\mu}_1 = 157,073.$$

Проверяем, достигнута ли требуемая точность:

$$\left| \frac{\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_0}{\hat{\mu}_0} \right| = \left| \frac{157,073 - 152,696}{152,696} \right| = 0,029 > \varepsilon = 0,01;$$

$$\left| \frac{\hat{s}_1 - \hat{s}_0}{\hat{s}_0} \right| = \left| \frac{69,955 - 68,514}{68,514} \right| = 0,021 > \varepsilon = 0,01.$$

Аналогично вычисляем $\hat{\mu}_2 = 157,85$ и $\hat{s}_2 = 70,208$.

Поскольку

$$\left| \frac{\hat{\mu}_2 - \hat{\mu}_1}{\hat{\mu}_1} \right| = \left| \frac{157,85 - 157,073}{157,073} \right| = 4,9 \cdot 10^{-3} < \varepsilon = 0,01;$$

$$\left| \frac{\hat{s}_2 - \hat{s}_1}{\hat{s}_1} \right| = \left| \frac{70,208 - 69,955}{69,955} \right| = 3,6 \cdot 10^{-3} < \varepsilon = 0,01.$$

то условия (И.5) выполняются. Следовательно, оценки параметров $\hat{\mu}_2 = 157,85$ и $\hat{s}_2 = 70,208$ принимаем в качестве окончательных.

Эффективность точечных оценок. Получаемые точечные оценки эффективны, когда выборки типа (5.5) имеют достаточно большое количество наработок до отказа. Однако наиболее ответственные несущие узлы вагона в эксплуатации разрушаются редко. Применительно к таким узлам эффективность точечных оценок резко падает.

Возникает необходимость в контроле качества точечных оценок, для чего используются интервальные оценки.

В этом случае указывается интервал $[t_1, t_2]$, в который с заданной вероятностью $(1 - \alpha)$ покрывает неизвестное значение параметра Q_i :

$$P\{t_1 \leq \hat{Q}_i \leq t_2\} = 1 - \alpha.$$

Здесь отрезок $[t_1, t_2]$ – доверительный интервал параметра Q_i , α – уровень значимости (вероятность, которой допустимо пренебречь в рамках решения конкретной задачи), $\alpha = 0,05-0,1$.

5.6.4 Определение точечных оценок параметров распределений при неизвестном законе распределения

Если вид функции распределения априори (до опыта) неизвестен или известен предположительно, процедура статистической обработки должна предусматривать более детальное исследование выборки в следующей последовательности:

- получение статистического ряда и определение его характеристик;
- построение гистограммы, полигона и эмпирической функции распределения;
- принятие гипотезы о виде закона распределения;
- оценка точечных значений параметров предполагаемого закона распределения (при положительном результате предыдущего этапа);
- проверка соответствия экспериментальных данных принятой гипотезе о законе распределения (оценка согласия опытного распределения с гипотетическим по количественному критерию);
- оценка интервальных значений параметров закона распределения.

Ниже будут рассмотрены более подробно этапы статистической обработки информации.

Отметим, что в практической деятельности для выбора закона распределения и определения его параметров применяют пакеты прикладных программ. Пример исследования закона распределения случайной величины с использованием пакета статистического анализа данных приведен в учебном пособии [26].

Получение статистического ряда и определение его характеристик.

Первый шаг в обработке статистических данных выборки – расположение элементов выборки в порядке возрастания.

Упорядоченный ряд значений случайной величины, составляющих выборку, называется *вариационным или ранжированным рядом*.

Общее число членов вариационного ряда n (число элементов выборки) называется *объемом выборки*.

Разность между крайними вариантами (порядковыми статистиками) составляет *размах R вариационного ряда*,

$$R = t_{\max} - t_{\min}. \quad (5.33)$$

Как уже отмечалось, в результате испытаний могут быть получены выборки двух типов:

- полные – включающие полные реализации (наработки до отказа);
- усеченные – включающие полные и неполные реализации (наработки до отказа и безотказные наработки).

Вариационный ряд для статистических данных усеченной выборки включает, таким образом, как полные реализации, так и неполные, причем неполные реализации отмечаются каким-нибудь значком, например, звездочкой.

Предположим, что при испытаниях по плану $[NRT]$ получены следующие значения (в тыс. км) наработок до отказа (полных реализаций) – 34, 101, 11, 69, 125, 24, 148, 13, 15, 103, 21, 29, 4, 38, 80, 35, 57, 3, 126, 56, 38, 9, 60 и безотказных наработок (неполных реализаций) – 7, 13, 18, 60, 60, 120, 150, 170, 170, 170, 170.

Вариационный ряд в этом случае будет иметь вид: 3, 4, 7*, 9, 11, 13, 13*, 15, 18*, 21, 24, 29, 34, 35, 38, 38, 56, 57, 60, 60*, 60*, 69, 80, 101, 103, 120*, 125, 126, 148, 150*, 170*, 170*, 170*, 170*.

Число полных реализаций – $d = 23$, число неполных реализаций – $c = 11$, общее число реализаций – $N = d + c = 34$.

Для *усеченных выборок* объем выборки n и размах вариационного ряда R вычисляются по полным реализациям, т.е. в данном случае $n = 23$, $R = 148 - 3 = 145$ тыс. км.

В качестве графического аналога вариационного ряда удобно использовать ранжированную *диаграмму реализаций* [22], в которой полные реализации расположены в порядке возрастания, а затем неполные в порядке убывания величин реализаций (рисунок 5.9).

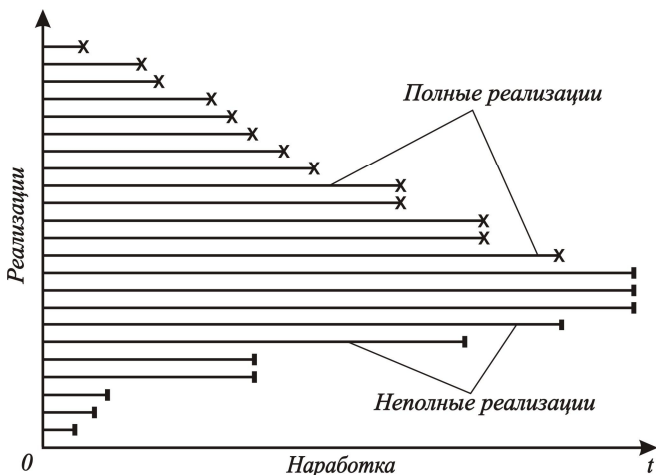


Рисунок 5.9 – Пример ранжированной диаграммы реализаций

Дальнейшая обработка статистических данных заключается в группировке (сводке) их в интервалы, величина которых определяется по формуле

$$h = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{1 + 3,3 \lg n}, \quad (5.34)$$

где t_{\max}, t_{\min} – соответственно наибольший и наименьший варианты вариационного ряда;

k – число интервалов, определяемое, используя правило Старджесса, по формуле $k = 1 + 3,3 \lg n$.

Затем для каждого j -го интервала определяют:

- частоту (количество значений) m_j ;
- частоту \hat{p}_j (относительную частоту, статистическую вероятность),

$$\hat{p}_j = m_j / n;$$

- накопленную частоту (накопленную статистическую вероятность),

$$\hat{F}_j(t) = \sum \hat{p}_j;$$

- статистическую плотность вероятности $\hat{f}_j(t)$,

$$\hat{f}_j(t) = m_j / n h_j,$$

где n – объем выборки.

В случае усеченных выборок

$$\hat{p}_j = m_j / (N - c_j), \quad \hat{f}_j(t) = m_j / (N - c_j) h_j,$$

где m_j – число полных реализаций вариационного ряда в j -м интервале;

N – общее число реализаций в выборке (число членов вариационного ряда);

c_j – число неполных реализаций, не превышающих правой границы рассматриваемого j -го интервала.

В результате сводки данных в интервалы получаем *статистический интервальный ряд* (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Статистический интервальный ряд

| | | | | | | |
|--|------------------|------------------|-----|------------------|-----|------------------|
| Интервалы наблюдаемых значений (в единицах показателя надежности) | $t_1 - t_2$ | $t_2 - t_3$ | ... | $t_j - t_{j-1}$ | ... | $t_k - t_{k+1}$ |
| Частота m_j | m_1 | m_2 | ... | m_j | ... | m_k |
| Частость \hat{p}_j | \hat{p}_1 | \hat{p}_2 | ... | \hat{p}_j | ... | \hat{p}_k |
| Накопленная частость $\hat{F}_j(t) = \sum \hat{p}_j$ | $\sum \hat{p}_1$ | $\sum \hat{p}_2$ | ... | $\sum \hat{p}_j$ | ... | $\sum \hat{p}_k$ |
| Статистическая плотность вероятности $\hat{f}_j(t)$ | $\hat{f}_1(t)$ | $\hat{f}_2(t)$ | ... | $\hat{f}_j(t)$ | ... | $\hat{f}_k(t)$ |

Основными статистическими характеристиками являются:

- *выборочное среднее* – статистический начальный момент первого порядка –

$$\hat{m}_t = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{\sum_{j=1}^k t_j m_j}{n} = \sum_{j=1}^k t_j p_j;$$

• *выборочная дисперсия* – статистический центральный момент второго порядка –

$$\widehat{s}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \widehat{m}_t)^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (t_j - \widehat{m}_t)^2 m_j, \quad \text{для } n > 20;$$

$$\widehat{s}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \widehat{m}_t)^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k (t_j - \widehat{m}_t)^2 m_j, \quad \text{для } n \leq 20;$$

• *выборочное среднее квадратическое отклонение* –

$$s = \sqrt{\widehat{s}^2},$$

где t_j – срединное значение j -го интервала.

Используют также следующие статистические характеристики:

• *выборочная мода* – значение случайной величины (наработки), имеющее наибольшую вероятность (значение признака, встречающееся с наибольшей частотой);

• *выборочная медиана* – значение признака, относительно которого эмпирическая совокупность делится на две равные по числу членов части;

• *статистический центральный момент третьего порядка* –

$$\mu_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \widehat{m}_t)^3 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (t_j - \widehat{m}_t)^3 m_j;$$

• *статистический центральный момент четвертого порядка* –

$$\mu_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \widehat{m}_t)^4 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (t_j - \widehat{m}_t)^4 m_j.$$

Примечания

1 *Выборочная медиана* – центральная порядковая статистика вариационного ряда, т.е. член с номером $k = (n+1)/2$, если n – нечетное число. Если объем выборки n – четное число, то выборочная медиана определяется как средняя (полусумма) двух центральных порядковых статистик.

2 Третий центральный момент характеризует отклонение кривой распределения от симметричной. При $\mu_3 = 0$ кривая распределения симметрична, при $\mu_3 < 0$ имеет левостороннюю асимметрию, при $\mu_3 > 0$ – правостороннюю.

3 Четвертый центральный момент характеризует островершинность (эксцесс) эмпирического распределения.

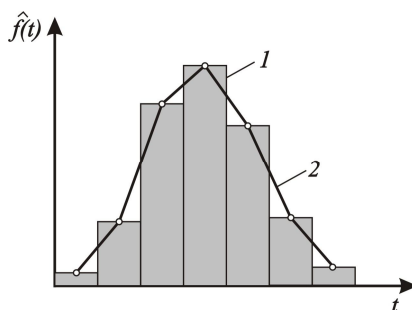
Большое значение для наглядного представления статистических рядов имеют графические методы их изображения. Наибольшее распространение

среди них получили полигон, гистограмма и эмпирическая функция распределения.

Построение гистограммы, полигона и эмпирической функции распределения. Г и с т о г р а м м а – графическое изображение интервального статистического ряда. Она является статистическим аналогом дифференциального закона распределения непрерывной случайной.

Графически гистограмма изображается рядом прямоугольников шириной h_j и высотой $\hat{f}_j(t)$ ($\hat{f}_j(t) = m_j / n h_j$) или (m_j / h_j) , то есть высота прямоугольника пропорциональна частотам или частотам интервала (рисунок 5.10). В первом случае получают *гистограмму частот* (относительных частот), во втором – *гистограмму частот*.

Рисунок 5.10 – Гистограмма (1) и полигон (2) относительных частот интервального вариационного ряда



При уменьшении величины каждого интервала гистограмма будет приближаться к некоторой плавной кривой, соответствующей графику функции плотности распределения случайной величины τ . Следовательно, в результате построения гистограммы можно получить представление о дифференциальном законе распределения случайной величины.

Отметим, что форма гистограммы зависит от числа и величины интервалов разбиения. При слишком малом числе интервалов разбиения (интервал велик) плохо выявляются характерные особенности распределения. С ростом числа интервалов характерные особенности выявляются все лучше, но лишь до определенного предела. Но при слишком большом числе интервалов (интервал слишком мал) гистограмма снова теряет характерные особенности распределения, превращаясь в чередование «пустых» интервалов и одинаковых по высоте прямоугольников.

П о л и г о н распределения применяется для изображения дискретных и интервальных статистических рядов.

При построении полигона относительных частот (или частот) для дискретного статистического ряда необходимо соединить прямыми точки с координатами $(t_i, p_i$ или $t_i, m_i)$, для интервального статистического ряда –

соединить отрезками середины верхних сторон прямоугольников гистограммы (см. рисунок 5.10), где t_i – варианты; p_i, m_i – частость и частота варианта.

Эмпирическая функция распределения (ЭФР) (статистическая функция распределения, кумулятивная кривая, функция накопленных частостей) является статистическим аналогом функции распределения генеральной совокупности (теоретической функции распределения). Эмпирическая функция распределения определяет для каждого t_i частость (статистическую вероятность) события, заключающегося в том, что исследуемая случайная величина τ примет значение, меньшее t_i , т.е.

$$\hat{F}(t_i) = \hat{P}(\tau < t_i),$$

Примечание – Отличие эмпирической функции распределения от теоретической состоит в том, что теоретическая функция распределения определяет вероятность события ($\tau < t_i$), а эмпирическая функция – относительную частоту этого же события.

Для интервального статистического ряда ЭФР имеет вид ступенчатой кривой (рисунок 5.11). Ширина каждой ступеньки соответствует длине интервала, а ее высота – значению накопленной частоты или частости. Для дискретного статистического ряда ЭФР имеет вид ломаной линии, отрезки которой соединяют точки с координатами $[t_i, \hat{F}(t_i)]$.

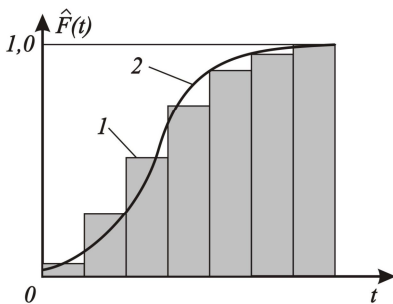


Рисунок 5.11 – Функции распределения:
1 – эмпирическая; 2 – теоретическая

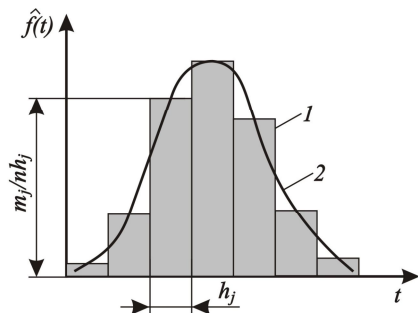


Рисунок 5.12 – Гистограмма (1) и теоретическая функция (2) плотности распределения

Принятие гипотезы о виде закона распределения. По форме гистограммы можно принять гипотезу о том, какой из известных теоретических законов распределения по форме кривой распределения наиболее точно ап-

проксирует статистические данные об отказах (рисунок 5.12). В первом приближении для выбора закона распределения можно также использовать значение коэффициента вариации.

Предварительная оценка непротиворечивости экспериментальных данных принятому (гипотетическому) распределению производится графически по вероятностной бумаге соответствующего распределения. При этом значения ЭФР, вычисленные в соответствии для каждой из полных реализаций вариационного ряда, наносятся на вероятностную бумагу, соответствующую принятому (гипотетическому) распределению. Результаты считаются положительными, если траектория точек ЭФР на вероятностной бумаге может быть аппроксимирована прямой линией.

Оценка точечных значений параметров. Точечные значения параметров могут быть оценены каким-либо из аналитических методов (методом моментов, методом максимального правдоподобия и др.), рассмотренных в п. 5.6.2, или графически по положению кривой, аппроксимирующей точки ЭФР на вероятностной бумаге. Процедуры оценки точечных значений параметров распределений по вероятностным бумагам достаточно полно описаны в литературе.

Проверка согласия опытного распределения с теоретическим. На заключительном этапе обработки производится проверка гипотезы о виде функции распределения по количественному критерию. Наиболее употребительными являются два критерия – Пирсона и Колмогорова.

5.6.5 Оценка показателей надежности при известном законе распределения

Точечные оценки показателей надежности при известном законе распределения вычисляются параметрическими методами по формулам таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Формулы для вычисления точечных оценок показателей надежности при известном законе распределения

| Закон распределения с функцией | Формулы для вычисления | | |
|---|--|---|--|
| | вероятности безотказной работы за наработку t $\hat{P}(t)$ | средних показателей $\hat{T}_{\text{ср}}$ | гамма-процентных показателей \hat{T}_{γ} |
| Экспоненциальный $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ | $\exp(-\hat{\lambda}t)$ | $\frac{1}{\hat{\lambda}}$ | $\frac{1}{\hat{\lambda}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)$ |

Окончание таблицы 5.2

| Закон распределения с функцией | Формулы для вычисления | | |
|---|--|---|--|
| | вероятности безотказной работы за наработку t $\hat{P}(t)$ | средних показателей $\hat{T}_{\text{ср}}$ | гамма-процентных показателей \hat{T}_{γ} |
| Вейбулла $F(t) = 1 - e^{-(t/a)^b}$ | $\exp[-(t/\hat{a})^{\hat{b}}]$ | $\hat{a} \cdot \Gamma(1 + 1/\hat{b})$ | $\hat{a} \cdot \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right)^{1/\hat{b}}$ |
| Нормальный $F(t) = F_0\left(\frac{t - \mu}{s}\right)$ | $F_0\left(\frac{\hat{\mu} - t}{\hat{s}}\right)$ | $\hat{\mu}$ | $\hat{\mu} - u_{\gamma} \hat{s}$ |
| Логарифмически нормальный $F(t) = F_0\left(\frac{\ln t - \mu}{s}\right)$ | $F_0\left(\frac{\hat{\mu} - \ln t}{\hat{s}}\right)$ | $\hat{\mu}$ | $\hat{\mu} - u_{\gamma} \hat{s}$ |

В таблице 5.2:

$\hat{P}(t)$ – оценка вероятности безотказной работы $P(t)$ за наработку t ;

$\hat{T}_{\text{ср}}$ – оценка средних показателей надежности $T_{\text{ср}}$;

\hat{T}_{γ} – оценка гамма-процентных показателей надежности T_{γ} ;

$\exp(\dots)$ – основание натуральных логарифмов ($e = 2,71828\dots$);

$F_0(\dots)$ – функция нормального распределения (нормированного);

$\Gamma(\dots)$ – гамма-функция;

$\gamma/100$ – регламентированная вероятность;

$\hat{\lambda}$ – оценка параметра λ экспоненциального распределения;

\hat{a}, \hat{b} – оценки параметров a, b распределения Вейбулла;

$\hat{\mu}, \hat{s}$ – оценки параметров μ, s нормального распределения;

u_{γ} – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности γ . Значения u_{γ} даны в таблице приложения В.

Значения функций e^{-x} , $\Gamma(x)$, $F_0(x)$ табулированы и приведены в таблицах приложений Г, Д и А соответственно.

Интервальные оценки показателей надежности для основных распределений – экспоненциального, Вейбулла и нормального вычисляются по формулам, приведенным в приложении К.

Пример 5.14. Для условий примера 5.12, приведенного в п. 5.6.3 для оценки параметров распределения Вейбулла, определить точечные оценки вероятности безотказной работы $P(t)$ за наработку $t = 50, 100$ и 200 тыс. км, а также точечные и интервальные оценки с доверительной вероятностью $q = 0,9$ средней наработки до отказа T_{cp} и гамма-процентной (90 %) наработки до отказа $T_{\gamma=90\%}$.

Точечные оценки параметров распределения Вейбулла, полученные в п. 5.6.3 методом последовательных приближений, равны $\hat{a} = 295,879$, $\hat{b} = 1,297$.

Р е ш е н и е.

1 Вычисляем точечные оценки показателей надежности для распределения Вейбулла с помощью формул, приведенных в таблице 5.2.

Тогда, вероятности безотказной работы:

за наработку $t = 50$ тыс. км –

$$\hat{P}(t = 50) = \hat{P}(50) = \exp(-t / \hat{a})^{\hat{b}} = \exp(-50 / 295,879)^{1,297} = 0,803 ;$$

за наработку $t = 100$ тыс. км –

$$\hat{P}(100) = \exp(-100 / 295,879)^{1,297} = 0,645 ;$$

за наработку $t = 200$ тыс. км –

$$\hat{P}(200) = \exp(-200 / 295,879)^{1,297} = 0,416 .$$

Точечные оценки:

средней наработки до отказа –

$$\hat{T}_{cp} = \hat{a} \cdot \Gamma(1 + 1/\hat{b}) = 295,879 \cdot \Gamma(1 + 1/1,297) = 295,879 \cdot \Gamma(1,771) = 273,404 \text{ тыс. км};$$

90%-й наработки до отказа –

$$\hat{T}_{\gamma=90\%} = T_{90\%} = \hat{a} \cdot \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{1/\hat{b}} = 295,879 \cdot (-\ln 0,9)^{1/1,297} = 52,175 \text{ тыс. км}.$$

2 Вычисляем интервальные оценки показателей надежности. Формулы для их определения в случае закона распределения Вейбулла приведены в таблице К.3.

Использование расчетных формул предполагает знание значений ε_n , ε_b – предельных относительных ошибок для оценки нижней и верхней доверительных границ соответствующего показателя надежности. Числовые значения ε_n , ε_b определяют по графикам, приведенным, в РД 50-690–89 для доверительной вероятности $q^* = 0,80; 0,90; 0,95$.

Последовательность определения ε_n , ε_b :

а) на оси абсцисс соответствующего графика откладываем значение r/N и восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с кривой, соответствующей числу объектов испытаний N ;

б) ординаты точки пересечения, отсчитанные по соответствующей шкале ν , указывают на значения ε_H (на нижней половине шкалы) и ε_B (на верхней половине шкалы). Значение ν определяем по формуле

$$\hat{\nu} = \frac{\sqrt{\Gamma(1 + 2/\hat{b}) - \Gamma^2(1 + 1/\hat{b})}}{\Gamma(1 + 1/\hat{b})}.$$

Отсюда

$$\hat{\nu} = \frac{\sqrt{\Gamma(1 + 2/1,297) - \Gamma^2(1 + 1/1,297)}}{\Gamma(1 + 1/1,297)} = 0,778.$$

Тогда для $q^* = 0,90$, $N = 20$, $r = m = 5$, $r/N = 5/20 = 0,25$ и $\hat{\nu} = 0,778$ оценки доверительных границ средней наработки до отказа по черт. 2 [30] будут составлять $\varepsilon_H = 0,47$, $\varepsilon_B = 1,4$; 90%-й наработки до отказа по черт 8 [30] – $\varepsilon_H = 0,5$, $\varepsilon_B = 1,5$.

Вычисляем нижнюю и верхнюю доверительные границы уровня q : для средней наработки до отказа:

$$\underline{T}_{cp} = \hat{T}_{cp}(1 - \varepsilon_H) = 273,404 \cdot (1 - 0,47) = 144,904 \text{ тыс. км};$$

$$\bar{T}_{cp} = \hat{T}_{cp}(1 + \varepsilon_B) = 273,404 \cdot (1 + 1,4) = 656,167 \text{ тыс. км};$$

для 90%-й наработки до отказа:

$$\underline{T}_{90} = \hat{T}_{90}(1 - \varepsilon_H) = 52,175 \cdot (1 - 0,5) = 26,088 \text{ тыс. км};$$

$$\bar{T}_{90} = \hat{T}_{90}(1 + \varepsilon_B) = 52,175 \cdot (1 + 1,5) = 78,263 \text{ тыс. км}.$$

5.6.6 Оценка показателей надежности при неизвестном законе распределения

Оценки показателей надежности при неизвестном законе распределения вычисляют непараметрическими методами.

Точечные оценки показателей надежности вычисляют при числе отказов (предельных состояний) за время испытаний (наблюдений) $r > 5$. При $r \leq 5$ используют нижние доверительные границы показателей надежности.

Последовательность вычисления оценок показателей надежности для планов [NUN], [NUR] и [NUT]:

1 Выстраивают в общий вариационный ряд в порядке неубывания наработки до отказа и безотказные наработки – наработки до цензурирования (для планов, отличных от [NUN]).

Если отдельные значения наработки до отказа равны некоторым значениям наработок работоспособных изделий, то в вариационном ряду сначала указывают наработки до отказа, затем безотказные наработки.

2 Вычисляют оценку функции распределения $F(t_i)$ за наработку t_i :

$$\widehat{F}(t_i) = i/N, \quad i \leq m, \quad (5.35)$$

где t_i – отдельные значения случайной величины в выборке;

$m = r$ – для планов $[NUr]$, $[NUN]$;

$m = d$ – для плана $[NUT]$;

r – число отказов, до появления которых проводятся испытания (наблюдения);

d – число отказов за время испытаний (наблюдений);

t_i – отдельное значение случайной величины (наработки до отказа);

i – порядковый номер наработки в вариационном ряду;

N – общее число членов вариационного ряда.

3 Вычисляют точечные оценки:

• *средних показателей надежности*:

– для плана $[NUN]$ –

$$\widehat{T}_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i; \quad (5.36)$$

– для планов $[NUT]$ и $[NUr]$ –

$$\widehat{T}_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} + \frac{N-m}{m} \cdot t_m; \quad (5.37)$$

• *гамма-процентных показателей надежности* –

$$\widehat{T}_\gamma = t_{i-1} + d_1(t_i - t_{i-1}); \quad (5.38)$$

• *вероятности безотказной работы за наработку t* –

$$\widehat{P}(t) = 1 - \widehat{F}(t_{i-1}) - d_2[\widehat{F}(t_i) - \widehat{F}(t_{i-1})], \quad (5.39)$$

где t_m – наибольшая по значению наработка до отказа на момент окончания испытаний: $t_m = t_r$ – для планов $[NUr]$, $[NRr]$, $[NMrr]$, $t_m = T$ – для планов $[NUT]$, $[NRT]$, $[NMT]$;

t – заданная наработка для определения оценки вероятности безотказной работы $P(t)$;

$\widehat{F}(t_i)$ – оценка функции распределения $F(t_i)$ за наработку $t_i > t$;

$\widehat{F}(t_{i-1})$ – оценка функции распределения $F(t_{i-1})$ за наработку $t_{i-1} < t$;

$\gamma/100$ – регламентированная вероятность;

$$d_1 = \frac{(1-\gamma/100) - \widehat{F}(t_{i-1})}{\widehat{F}(t_i) - \widehat{F}(t_{i-1})} \quad \text{при условии } \widehat{F}(t_{i-1}) < (1-\gamma/100) < \widehat{F}(t_i); \quad (5.40)$$

$$d_2 = \frac{t - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad \text{при условии } t_{i-1} < t < t_i; \quad (5.41)$$

Примечания

1 $\widehat{T}_\gamma = t_{i-1}$ или $\widehat{T}_\gamma = t_i$, если $(1-\gamma/100) = \widehat{F}(t_{i-1})$ или $(1-\gamma/100) = \widehat{F}(t_i)$;

2 $\widehat{P}(t) = 1 - \widehat{F}(t_{i-1})$ или $\widehat{P}(t) = 1 - \widehat{F}(t_i)$, если $t = t_{i-1}$ или $t = t_i$;

3 $\widehat{P}(t) = \left(\sum_{i=1}^k \overline{P}(t_i) \right) / (k-l+1)$, если $t = t_i = t_{i+1} = \dots = t_k$ ($k \leq r$).

При заданной доверительной вероятности q^* для двустороннего интервала доверительную вероятность q для одностороннего интервала определяют по формуле $q = (1 + q^*)/2$. Соответственно $q^* = 2q - 1$.

4 Вычисляют интервальные оценки:

- *средних показателей надежности:*

– нижняя доверительная граница уровня q –

$$\underline{T}_{\text{cp}} = \widehat{T}_{\text{cp}} - U_q \sqrt{\sum_{i=1}^r \frac{\Delta F(t_i)}{r} (t_i - \widehat{T}_{\text{cp}})^2}; \quad (5.42)$$

– верхняя доверительная граница уровня q –

$$\overline{T}_{\text{cp}} = \widehat{T}_{\text{cp}} + U_q \sqrt{\sum_{i=1}^r \frac{\Delta F(t_i)}{r} (t_i - \widehat{T}_{\text{cp}})^2}; \quad (5.43)$$

- *гамма-процентных показателей надежности:*

– нижняя доверительная граница уровня q –

$$\underline{T}_\gamma = t_{i-1} + d_3(t_i - t_{i-1}); \quad t_0 = 0; \quad (5.44)$$

– верхняя доверительная граница уровня q –

$$\overline{T}_\gamma = t_{i-1} + d_4(t_i - t_{i-1}); \quad t_0 = 0; \quad (5.45)$$

• *вероятности безотказной работы за наработку t :*

– нижняя доверительная граница уровня q –

$$\underline{P}(t) = 1 - \overline{F}(t_{i-1}) - d_2[\overline{F}(t_i) - \overline{F}(t_{i-1})] \quad (5.46)$$

при условии $t_{i-1} < t < t_i$ и $t < t_m$;

– верхняя доверительная граница уровня q –

$$\overline{P}(t) = 1 - \underline{F}(t_{i-1}) - d_2[\underline{F}(t_i) - \underline{F}(t_{i-1})] \quad (5.47)$$

при условии $t_{i-1} < t < t_i$ и $t < t_m$,

где U_q – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности q ;

$$\Delta F(t_i) = F(t_i) - F(t_{i-1});$$

$\underline{F}(t_i), \overline{F}(t_i)$ – нижняя и верхняя доверительные границы функции распределения для наработки $t_i > t$;

$\underline{F}(t_{i-1}), \overline{F}(t_{i-1})$ – нижняя и верхняя доверительные границы функции распределения для наработки $t_{i-1} < t$,

$$\overline{F}(t_i) = \frac{\chi_q^2[2(r_i + 1)]}{2N - r_i + 0,5\chi_q^2[2(r_i + 1)]},$$

$$\underline{F}(t_i) = \frac{\chi_{1-q}^2(2r_i)}{2N - r_i + 0,5\chi_{1-q}^2(2r_i)};$$

$\chi_q^2(l)$ – квантиль хи-квадрат распределения с числом степеней свободы l , соответствующий вероятности q ;

$$d_3 = \frac{(1 - \gamma/100) - \overline{F}(t_{i-1})}{\overline{F}(t_i) - \overline{F}(t_{i-1})} \quad \text{при условии } \overline{F}(t_{i-1}) < (1 - \gamma/100) < \overline{F}(t_i); \quad (5.48)$$

$$d_4 = \frac{(1 - \gamma/100) - \underline{F}(t_{i-1})}{\underline{F}(t_i) - \underline{F}(t_{i-1})} \quad \text{при условии } \underline{F}(t_{i-1}) < (1 - \gamma/100) < \underline{F}(t_i). \quad (5.49)$$

Примечания

1 $\underline{T}_\gamma = t_{i-1}$, $\underline{T}_\gamma = t_i$ или $\overline{T}_\gamma = t_i$,

если $(1 - \gamma/100) = \overline{F}(t_{i-1})$, $(1 - \gamma/100) = \overline{F}(t_i)$ или $(1 - \gamma/100) = \underline{F}(t_i)$;

2 $\overline{P}(t) = 1 - \underline{F}(t_{i-1})$, $\underline{P}(t) = 1 - \overline{F}(t_i)$ или $\overline{P}(t) = 1 - \underline{F}(t_i)$,

если $t = t_{i-1}$ или $t = t_i$ соответственно;

3 $\underline{P}(t) = \left(\sum_{i=1}^k \underline{P}(t_i) \right) / (k - l + 1) = \left(\sum_{i=1}^k \overline{P}(t_i) \right) / (k - l + 1)$,

если $t = t_i = t_{i+1} = \dots = t_k$ ($k \leq r$).

6 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВАГОНОВ

Как отмечалось выше, надежность вагона закладывается при его проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается при эксплуатации.

6.1 Обеспечение надежности вагонов на этапах проектирования и изготовления

Для обеспечения надежности особенно важны первые два этапа жизненного цикла вагона – проектирование и изготовление. Каждый элемент изделия имеет заложенный в нее конструктором уровень надежности. В то же время в процессе изготовления любая неточность или отклонение может привести к уменьшению надежности.

Поэтому ответственность конструктора не ограничивается этапом проектирования, она распространяется и на этап изготовления. Он должен задать тип и способ изготовления элементов, задать допуски и прочность материалов, технологию производственных процессов, методы контроля качества (отбраковки) элементов и виды испытаний.

Обеспечение надежности вагонов на этапе проектирования. При разработке конструкции вагона перед конструктором стоят две задачи: спроектировать конструкцию с заданными характеристиками и с заданным уровнем надежности в течение заданного времени.

При проектировании конструктор должен проводить анализ надежности на всех этапах проектирования. Анализ представляет собой расчет надежности систем или элементов по надежности применяемых элементов. Любая конструкция, в том числе и вагона, выполнена из модулей, узлов или подсистем, надежности которых должны обеспечить заданную общую надежность.

При недостаточной надежности отдельных элементов можно использовать следующие средства получения надежных систем: облегчение режима работы, резервирование, использование высоконадежных элементов и упрощение конструкции.

Облегчение режима работы означает работу элементов при нагружении, напряжениях, мощности и других меньших их номинальных значений. Так, детали, работающие при напряжениях ниже предела выносливости, имеют практически неограниченный срок службы.

Резервирование – нагруженное и ненагруженное – мощное средство получения надежных систем из ненадежных элементов. Однако при этом увеличиваются габариты и масса конструкции, что осложняет использование резервирования в вагонных конструкциях.

Использование высоконадежных элементов и упрощение конструкции, т. е. уменьшение числа элементов в конструкции, – эффективные средства получения надежных систем при последовательном соединении элементов.

Таким образом, творцом надежности изделия является конструктор, и его задача состоит в том, чтобы разработать возможно менее сложную систему с меньшим числом элементов и использованием высоконадежных элементов, которая имеет требуемые характеристики и минимальную вероятность отказа.

Гарантируемые в технической документации показатели надежности вагона закладываются в ходе проектирования. Можно выделить следующие *основные направления повышения надежности на этапе проектирования*:

1 Выбор конструктивной схемы вагона и конструкции отдельных его узлов, отвечающих требуемым условиям эксплуатации.

2 Использование конструктивных решений для уменьшения усилий, действующих на вагон и его составные части (увеличение статического прогиба, уменьшение массы необрессоренных частей, снижение центра тяжести вагона, применение поглощающих аппаратов повышенной энергоемкости и др.).

3 Выбор целесообразных конструктивных форм составных частей вагона (применение цельнонесущих кузовов, придания деталям рациональной формы, соответствующей основным деформациям, возникающим в них, и др.).

4 Применение в конструкции элементов и узлов с высокой надежностью, а также использование структурных методов повышения надежности (резервирования).

5 Выбор конструктивных материалов, способов защиты и контроля, соответствующих особенностям эксплуатации. Используемые материалы должны иметь повышенную коррозионную стойкость, а также улучшенные характеристики усталостной и статической прочности.

6 Выполнение комплекса расчетов для обоснования решений по выбору конструктивной схемы вагона и конструкции отдельных его узлов и элементов, используя метод конечных элементов и системы автоматизированного проектирования (САПР).

7 Отработка конструкторских решений на технологичность, обеспечивающая качественное и экономичное изготовление оборудования на основе прогрессивных технологических процессов.

8 Отработка конструкторских решений на ремонтпригодность. Конструкция вагона должна быть приспособлена к техническому обслуживанию, контролю технического состояния и ремонту.

Более подробно некоторые из приведенных направлений были рассмотрены в подразд. 1.1.

Обеспечение надежности вагонов на этапе изготовления. Этапы изготовления и монтажа чрезвычайно важны для последующей безотказной эксплуатации вагонов. Анализ статистических данных показывает, что значительная часть отказов вагонов вызвана соответствующими технологическими дефектами. Поэтому на стадиях производства и монтажа предусматривается целый ряд специальных мероприятий для повышения надежности вагонов. К числу главных из них относятся:

1 Широкое применение современных *способов контроля качества* на всех стадиях производственного процесса – от входного контроля исходных материалов и полуфабрикатов до контроля финишных операций, стендовых или натурных испытаний. Целесообразность входного контроля подтверждается статистикой дефектов, обнаруженных при ультразвуковом контроле исходных заготовок и материалов. Хотя отбраковка при входном контроле составляет доли процента, она предотвращает отказы вагонов в эксплуатации.

Задача контроля качества – проверка производственного процесса с тем, чтобы *обеспечить в готовом изделии характеристики и уровень надежности, заложенные в него конструктором.*

2 Применение прогрессивного технологического оборудования на определяющих операциях, например, обрабатывающих центров с программным управлением для обработки деталей вагонов, крупных ковочных и штамповочных прессов для получения заготовок базовых элементов и др.

3 Механизация и автоматизация процессов сварки, расширение использования прогрессивных сварочных процессов.

4 Повышение надежности путем замены литых деталей цельноштампованными и штампованными конструкциями.

Вопросы обеспечения надежности на этапе изготовления рассмотрены также в подразд. 1.1.

6.2 Особенности поддержания надежности вагонов на этапе эксплуатации

Основные принципы поддержания надежности вагонов на этапе эксплуатации. Хорошо спроектированный, качественно изготовленный и

правильно эксплуатируемый вагон не должен отказывать в работе в течение заданного времени. Однако даже удачная конструкция, совершенная технология и правильная эксплуатация не исключают возникновения отказов.

Как следует из рисунка 2.10, кривая «жизни» вагона – кривая интенсивности отказов $\lambda(t)$ – характеризуется тремя характерными периодами функционирования: приработки, нормальной работы и интенсивного износа, которым соответствуют три характерных типа отказов: ранние (прирабочные); внезапные и износовые.

Период приработки $(0, t_1)$ характеризуется высокой интенсивностью отказов вначале периода, которая затем монотонно уменьшается. Это обусловлено тем, что в любой партии вновь изготовленных однотипных элементов вагонов всегда имеются нестандартные, дефектные. Поскольку дефектные элементы после начала эксплуатации отказывают один за другим, то после их замены исправными интенсивность отказов относительно быстро уменьшается и становится приблизительно постоянной величиной к моменту t_1 , когда дефектные элементы уже отказали. Период приработки еще называют периодом «выжигания».

Для периода приработки характерны *ранние (прирабочные) отказы*, которые обусловлены плохой технологией производства и плохим контролем качества изделий при их изготовлении. Ранние отказы могут быть исключены процессами отбраковки и приработки.

Период нормальной работы (t_1, t_2) характеризуется примерно постоянным уровнем интенсивности отказов. В этот период элементы могут использоваться наиболее успешно.

В этот период имеют место *внезапные отказы*. Они не могут быть устранены ни хорошим изготовлением, ни хорошим обслуживанием. Внезапные отказы возникают неожиданно вследствие внезапной концентрации внешних нагрузок и внутренних напряжений, превышающих расчетные. Исключить внезапные отказы нелегко.

Хорошей аппроксимацией внезапных отказов является экспоненциальное распределение.

Период интенсивного износа (t_2, ∞) или период старения характеризуется тем, что после достижения времени t_2 в материале элементов происходят необратимые физико-химические изменения, они стареют, изнашиваются. В результате интенсивность отказов начинает довольно быстро возрастать.

Для периода интенсивного износа характерны *износовые отказы*. Они обусловлены износом отдельных деталей, что является признаком старения. Как правило, отказы за счет износа могут быть предотвращены. Одним из

возможных методов является замена через определенное время элементов, подверженных износу. При этом период времени между заменами должен быть меньше среднего периода износа.

Износные отказы хорошо описываются нормальным распределением.

В целом основные правила обеспечения надежности изделий следующие [1]:

1 *Перед монтажом объекта (системы) требуется проводить браковку дефектных элементов, а затем их приработку в системе.* Такая отбраковка позволит отсеять дефектные элементы, в результате чего в объекте появится значительно меньше отказов в начале эксплуатации.

2 *В период нормальной работы элементы должны заменяться только после отказа.* Внезапные отказы, возникающие в этот период и имеющие постоянную интенсивность, не могут быть устранены путем профилактической замены элементов.

3 *В конце периода нормальной работы t_2 необходима своевременная профилактическая замена элемента,* даже если он не отказал к этому времени. Замена элемента важна в случаях, когда надежная работа требуется на время, превышающее t_2 , – момента окончания периода нормальной эксплуатации. Поэтому после момента t_2 необходима профилактическая замена каждого элемента, прежде чем произойдет его отказ из-за износа. То есть ни один элемент не должен оставаться в работе без замены свыше времени t_2 . Иначе вероятность отказа элемента существенно увеличивается.

Таким образом, программа обеспечения надежности включает:

исключение сначала приработочных отказов – за счет приработки и отбраковки дефектных элементов;

уменьшение или полное исключение внезапных отказов – за счет применения специальных методов повышения надежности;

предупреждение износных отказов – за счет своевременной профилактической замены элементов.

Объект с высокой надежностью характеризуется высокой вероятностью безотказной работы, а следовательно, низкой интенсивностью отказов и большой средней наработкой на отказ.

Как отмечалось выше, высокий уровень надежности на продолжительный период можно получить с помощью соответствующей приработки, исключающей приработочные отказы, и с помощью профилактической замены элементов, устраняющей износные отказы. Основная цель – обеспечить такие условия работы, при которых могут возникать лишь внезапные отказы, количество которых с помощью специальных методов должно быть уменьшено до минимума.

Если налажено хорошее профилактическое обслуживание, то надежная работа объекта возможна в течение очень длительного времени. Профилактическая замена – условие надежной работы систем длительного пользования.

Обеспечение надежности вагонов при эксплуатации. Поступивший в эксплуатацию новый вагон обладает определенным уровнем надежности, заложенным при проектировании и обеспеченным при изготовлении. Основная задача эксплуатации – поддержание надежности вагона на достигнутом уровне.

Надежность вагона реализуется в условиях реальной эксплуатации и зависит:

- от влияния внешней среды;
- соблюдения режимов технической эксплуатации;
- организации контроля за техническим состоянием составных частей вагона;
- качества и периодичности выполнения операций технического обслуживания и ремонта;
- организации сбора, обработки и анализа статистических данных об отказах составных частей вагона, используемых для совершенствования их конструкции, технологии изготовления и ремонта.

Основные направления поддержания необходимого уровня надежности вагона на этапе эксплуатации рассмотрены в подразд. 1.1.

Влияние системы ремонта и технического обслуживания на фактические показатели надежности. Потеря вагоном ресурса и работоспособности в процессе эксплуатации – это неизбежный процесс, протекающий в зависимости от конструкции вагона и условий его использования с различной интенсивностью. Для восстановления утраченного ресурса и работоспособности требуется наличие системы ремонта и технического обслуживания вагонов (ТО). Без ремонта и ТО, которые являются обязательными этапами процесса эксплуатации, не может обойтись ни одно изделие, включая вагон.

Восстановление работоспособности вагонов должно производиться периодически, поскольку вагон теряет работоспособность постепенно. Поэтому очень важной является задача выбора периодов времени между ремонтами (межремонтный период) и установление объема ремонтных работ.

Система ремонта и ТО как раз и определяет периодичность и объемы ремонтных работ и должна обеспечивать в течение всего периода эксплуатации требуемый уровень надежности.

При разработке системы ремонта и ТО необходимо учитывать следующее:

- наличие в вагоне деталей и элементов с различными наработками до отказа (сроками службы);

- система ремонта назначается для вагона в целом, поэтому регламентированные наработки (сроки службы) отдельных узлов (деталей) должны назначаться с учетом периодичности ремонтов, принятой данной системой;
- технические возможности позволяют осуществить ремонт и восстановить утраченную работоспособность для любых отказов вагона, что требует больших или меньших затрат;
- технологические процессы, выбранные для проведения ремонтных работ, оказывают влияние на качественные показатели отремонтированных изделий.

Кроме того, необходимо установить *структуру ремонтного цикла* и определить *межремонтный период* – время между двумя последовательно проведенными ремонтами.

Основу любой системы ремонта, в том числе и вагонов, составляют плановые периодические ремонты – деповской и капитальный, которые неодинаковы по содержанию и производятся через заранее назначаемые промежутки времени. В периоды между плановыми ремонтами выполняют техническое обслуживание и неплановые текущие ремонты вагонов. Такую систему ремонта называют *планово-предупредительной*.

Определения понятий технического обслуживания, текущего, деповского и капитального ремонтов по ГОСТ 18322 приведены в подразд.1.2 при рассмотрении основных видов объектов исследования теории надежности.

Структура ремонтного цикла представляет собой последовательность чередующихся один за другим деповских ремонтов. Завершается ремонтный цикл капитальным ремонтом – основным видом ремонта. При капитальном ремонте ставится задача полного восстановления исправности и ресурса вагона. Капитальный ремонт часто совмещается с модернизацией вагона, при которой улучшаются его характеристики.

При установлении межремонтного периода возможны два подхода: элементный и общий. При элементном подходе определяют межремонтные периоды для каждой детали, которые затем группируются для получения соответствующего ремонтного цикла вагона. При общем подходе вагон рассматривается как единая система.

Рассмотрим определение межремонтного периода для группы однотипных деталей или узлов.

При одинаковом сроке службы (или ресурсе) T_{cp} однотипных деталей за величину межремонтного периода T_0 , естественно, следует принять именно значение T_{cp} . Однако решение задачи выбора межремонтного периода осложняется тем, что на практике имеет место рассеивание сроков службы однотипных деталей относительно среднего значения T_{cp} , что описывается определенным законом распределения (рисунок 6.1).

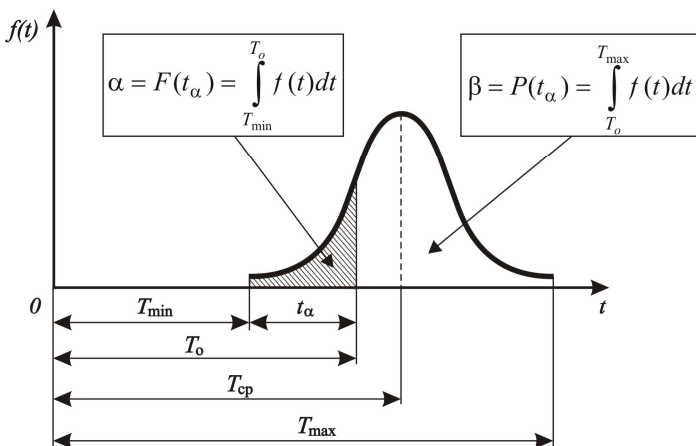


Рисунок 6.1 – К определению межремонтного срока службы деталей

Вероятностный характер сроков службы приводит к недоиспользованию фактической долговечности детали или к увеличению вероятности отказа в межремонтном периоде. При этом возможны два подхода к решению проблемы. В первом случае межремонтный период T_0 устанавливают, задаваясь допустимой вероятностью отказа $F(T_0) = \alpha$ детали. Данный подход можно рекомендовать для деталей, отказ которых в эксплуатации приводит к серьезным авариям или угрожает жизни людей. В случаях, когда отказ приводит только к материальному ущербу, межремонтный период целесообразно выбирать исходя из минимума суммарных затрат на восстановление работоспособности детали.

Рассмотрим первый подход.

Предположим, что срок службы деталей подчиняется нормальному закону распределения (см. рисунок 6.1). Как известно, практически вся зона рассеивания случайной величины, подчиняющейся нормальному закону, лежит в пределах $t = \pm 3s$, т. е. в пределах $6s$. Точки, соответствующие минимальному T_{\min} ($T_{\min} = T_{cp} - 3s$) и максимальному T_{\max} ($T_{\max} = T_{cp} + 3s$) значениям срока службы, показаны на рисунке 6.1. Поле рассеивания равно $T_{\max} - T_{\min}$.

Следовательно, рациональное значение межремонтного срока службы $T_0^{\text{рац}}$ будет находиться в пределах T_{\max} и T_{\min} , т. е. $T_{\min} < T_0^{\text{рац}} < T_{\max}$.

Ввиду симметричности дифференциальной кривой нормального распределения отказы деталей группируются около среднего значения T_{cp} . Напомним, что вероятность отказа в интервале срока службы $[T_{\text{min}}, t_1]$ равна площади под кривой плотности в этом интервале. Если принять за межремонтный период значение T_{cp} , то вероятности отказа и безотказной работы будут иметь одинаковые значения, т. е. к этому моменту примерно половина деталей откажет, а у второй половины будет недоиспользован ресурс.

Поэтому безотказную работу элементов с большей вероятностью можно получить только для срока службы, меньшего среднего значения T_{cp} . И чем меньше значение срока службы, тем меньше площадь под кривой плотности и, следовательно, меньше вероятность отказа.

В некоторых литературных источниках рекомендуется, чтобы межремонтный срок службы находился между значениями T_{cp} и T_{max} , т. е. был равен значению срока службы, соответствующего половине площади, заключенной между правой симметричной частью кривой распределения, или трем четвертям всей площади под кривой нормального распределения [21].

Приведем нормальное распределение с произвольными параметрами (μ, s) к стандартному нормальному закону с параметрами $\mu = 0$ и $s = 1$ с помощью линейного преобразования $x = (t - \mu/s)$. Используя интегральную нормированную функцию $F_0(x)$, установим, что три четверти площади под кривой распределения $[0,75F_0(x)]$ соответствует абсциссе $x = 1,15$. Тогда рациональный межремонтный срок службы будет

$$T_0^{\text{рац}} = T_{\text{cp}} + 1,15s. \quad (6.1)$$

Рассмотрим далее стоимостной подход к выбору межремонтного периода.

В зависимости от выбранного межремонтного периода имеют место две составляющие затрат: на выполнение неплановых $C_{\text{нр}}$ и плановых $C_{\text{пр}}$ ремонтов. Указанные составляющие затрат изменяются при увеличении или уменьшении межремонтного периода относительно T_{cp} , что приводит к изменению соотношения между вероятностью возникновения отказа $F(t_\alpha) = \alpha$ (вероятностью непланового ремонта) и вероятностью безотказной работы $P(t_\alpha) = \beta = 1 - \alpha$ (вероятностью планового ремонта).

Отсюда вероятности непланового $P_{\text{нр}}$ и планового $P_{\text{пр}}$ ремонтов будут

$$P_{\text{нр}} = \int_{T_{\text{мин}}}^{T_0} f(t)dt ; \quad P_{\text{пр}} = \int_{T_0}^{T_{\text{макс}}} f(t)dt , \quad (6.2)$$

где $f(t)$ – плотность распределения срока службы изделий;
 $T_{\text{мин}}$ – зона нечувствительности.

Суммарные затраты на выполнение ремонтов составят

$$C = C_{\text{нр}} + C_{\text{пр}} , \quad (6.3)$$

где $C_{\text{нр}}, C_{\text{пр}}$ – затраты на выполнение неплановых и плановых ремонтов;

$$C_{\text{нр}} = C'_{\text{нр}}N_{\text{нр}} ; \quad C_{\text{пр}} = C'_{\text{пр}}N_{\text{пр}} ; \quad (6.4)$$

$C'_{\text{нр}}, C'_{\text{пр}}$ – соответственно стоимость восстановления одного отказа при неплановом и плановом ремонтах;

$N_{\text{нр}}, N_{\text{пр}}$ – соответственно число изделий, восстановленных при неплановом и плановом ремонтах,

$$N_{\text{нр}} = N \int_{T_{\text{мин}}}^{T_0} f(t)dt ; \quad N_{\text{пр}} = N \left(1 - \int_{T_{\text{мин}}}^{T_0} f(t)dt \right) . \quad (6.5)$$

Оптимальным межремонтным периодом $T_0^{\text{опт}}$ будет период, соответствующий минимальным суммарным затратам $C_{\text{мин}}$.

Для определения оптимального межремонтного периода можно используют также удельные затраты – затраты, отнесенные к среднему времени безотказной работы и общему числу изделий:

$$C_0 = \frac{C}{NT_{\text{ср}}} = \frac{C_{\text{нр}}}{NT_{\text{ср}}} + \frac{C_{\text{пр}}}{NT_{\text{ср}}} , \quad (6.6)$$

где $T_{\text{ср}}$ – средний срок службы после периода $T_{\text{мин}}$,

$$T_{\text{ср}} = \int_{T_{\text{мин}}}^{T_0} P(t)dt . \quad (6.7)$$

Затем межремонтные периоды, полученные для каждого элемента вагона, группируются для получения межремонтного периода для вагона в целом $T_{\text{в}}$. При этом межремонтные периоды элементов должны быть кратны межремонтному периоду для вагона, т.е. $T_{\text{в}} = kT_0$.

Для анализа содержания отдельных видов ремонта при данном межремонтном периоде вагона все элементы вагона разбивают на группы. Так, к элементам 1-й группы ($k = 1$) относятся все элементы с межремонтным сроком T_0 , к элементам 2-й группы ($k = 2$) – все элементы с межремонтным сроком $2T_0$ и т.д.

Система технического обслуживания и ремонта грузовых и пассажирских вагонов. Существующая система технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов в к л ю ч а е т:

- техническое обслуживание (ТО);
- техническое обслуживание с диагностированием (ТОД);
- текущий отцепочный ремонт ТР-1, ТР-2;
- деповской ремонт (ДР);
- капитальный ремонт (КР);
- капитальный ремонт с продлением срока службы (КРП).

П р и м е ч а н и я

Техническое обслуживание с диагностированием (ТОД) – комплекс операций по инструментальному контролю технического состояния составных частей вагона с использованием диагностических средств, переводом вагонов в нерабочий парк и подачей на специализированные пути.

Текущий отцепочный ремонт (ТР-1) – ремонт порожнего вагона, выполняемый при его подготовке к перевозке с отцепкой от состава или группы вагонов;

Текущий отцепочный ремонт (ТР-2) – ремонт с целью восстановления работоспособности груженого или порожнего вагона, с отцепкой от транзитных и прибывших в разборку поездов или сформированных составов.

Капитальный ремонт с продлением срока службы (КРП) – контроль технического состояния всех несущих элементов конструкции вагона с восстановлением их назначенного ресурса, заменой или восстановлением любых его составных частей, включая базовые, и назначением срока службы.

Отметим, что текущий отцепочный ремонт (ТР-1 и ТР-2) и капитальный ремонт КРП не являются плановыми видами ремонта.

Н о р м а т и в ы п е р и о д и ч н о с т и выполнения капитальных ремонтов грузовых вагонов установлены по критерию календарной эксплуатации вагона от постройки (капитального ремонта), нормативы периодичности производства деповских ремонтов – по комбинированному критерию или по критерию календарной эксплуатации вагона в годах.

Для большей части вагонного парка применяют комбинированный критерий.

Комбинированный критерий предусматривает отбор вагонов в деповской ремонт по фактически выполненному объему работ в километрах пробега вагона и по предельно допускаемой календарной продолжительности использования вагона в перевозочном процессе между ремонтами. При наступлении предельного состояния одного из показателей вагон должен быть отобран в ремонт. Превышение норматива не допускается.

Нормативы периодичности проведения капитального и деповского ремонтов для основных типов грузовых вагонов приведены в таблицах 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1 – Нормативы периодичности проведения капитального ремонта грузовых вагонов

| Тип грузового вагона | Назначенный срок службы, лет | Капитальный ремонт, лет | |
|---|------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | | после постройки | после капитального ремонта |
| Крытый универсальный | 32 | 13 | 12 |
| Крытый вагон-хоппер для зерна | 30 | 15 | – |
| Крытый вагон-хоппер для минеральных удобрений | 26 | 10 | 8 |
| Крытый вагон-хоппер для цемента | 26 | 12 | 9 |
| Крытый для автомобилей | 30 | 15 | – |
| Платформа универсальная | 32 | 15 | 12 |
| Платформа для большегрузных и крупнотоннажных контейнеров | 32 | 17 | – |
| Платформа для перевозки автомобилей двухъярусная | 30 | 15 | – |
| Платформа для леса в хлыстах | 32 | 17 | – |
| Платформа для лесоматериалов | 32 | 17 | – |
| Полувагон универсальный | 22 | 11 | – |
| Полувагон для технологической щепы | 22 | 11 | – |
| Цистерна нефтебензиновая 4-осная | 32 | 13 | 12 |
| То же 8-осная | 32 | 11 | 11 |
| Цистерна для вязких нефтепродуктов | 32 | 10 | 10 |
| Цистерна для улучшенной серной кислоты | 18 | 6 | 6 |
| Цистерна для спиртов и пищевых продуктов | 30 | 10 | 10 |
| Цистерна для сжиженных газов | 40 | 10 | 10 |

Таблица 6.2 – Нормативы периодичности проведения деповского ремонта грузовых вагонов по комбинированному критерию

| Тип вагона | Первый после постройки | | После ДР | | После КР | |
|---|------------------------|------|----------|------|----------|------|
| | тыс. км | годы | тыс.км* | годы | тыс. км | годы |
| Универсальные крытые, платформы, цистерны нефтебензиновые и некоторые специальные крытые, полувагоны и цистерны | 210 | 3 | 110 | 3 | 160 | 3 |

Окончание таблицы 6.2

| Тип вагона | Первый после постройки | | После ДР | | После КР | |
|--|------------------------|------|----------|------|----------|------|
| | тыс. км | годы | тыс.км* | годы | тыс. км | годы |
| Полувагоны универсальные и с глухим кузовом, цистерны для большинства грузов, а также многие специальные крытые и полувагоны | 210 | 3 | 110 | 2 | 160 | 2 |
| Платформы для крупнотоннажных контейнеров и колесной техники | 210 | 3 | 120 | 3 | 210 | 3 |
| Платформы для крупнотоннажных контейнеров на тележках модели 18-9771, а также универсальные полувагоны и с глухим кузовом на тележках моделей 18-578, 18-7020, 18-9771 | 450** | 4 | 160 | 3 | 160 | 3 |
| <p>* Грузовым вагонам на тележках типа 2 (для осевой нагрузки 230,5 кН) после производства деповского ремонта с модернизацией тележки устанавливается норматив пробега до следующего планового ремонта в размере 160 тыс. км, а для универсальных полувагонов и с глухим кузовом (постройки до 2004 года) увеличивается и календарная продолжительность эксплуатации вагона до 3 лет.</p> <p>** Увеличение пробега до 450 тыс. км обеспечено за счет применения в подшипниках буксовых узлов смазки ЛЗ-ЦНИИ(у), Буксол, ЗУМ.</p> <p>Применение кассетных подшипников, обеспечивающих гарантированную наработку на отказ не менее 500 тыс. км позволяет устанавливать аналогичный пробег для грузовых вагонов</p> | | | | | | |

Система технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов предусматривает:

- техническое обслуживание (ТО-1, ТО-2 и ТО-3);
- текущий ремонт (ТР);
- деповской ремонт (ДР);
- капитальный ремонт первого и второго объема (КР-1, КР-2);
- капитальный ремонт повышенного объема с модернизацией (КРМ);
- капитально-восстановительный ремонт (КВР).

Примечания

Техническое обслуживание пассажирского вагона предусматривает:

техническое обслуживание (ТО-1) вагонов в составах и поездах на пунктах технического обслуживания станций формирования и оборота пассажирских поездов перед каждым отправлением в рейс, а также в поездах в пути следования;

техническое обслуживание (ТО-2) вагонов перед началом летних и зимних перевозок в пунктах формирования пассажирских поездов;

техническое обслуживание (ТО-3) – единая техническая ревизия основных узлов вагонов.

В зависимости от уровня восстановления ресурса капитальные ремонты подразделяют на следующие виды:

капитальный ремонт первого объема (КР-1) – выполняется для восстановления исправности и ресурса пассажирского вагона путем замены или ремонта изношенных и поврежденных его узлов и деталей;

капитальный ремонт второго объема (КР-2) – производится для восстановления исправности и ресурса пассажирского вагона с частичным вскрытием кузова до металла, заменой теплоизоляции на вскрытых местах и заменой электропроводки;

капитальный ремонт КРМ – выполняется в целях продления срока службы пассажирского вагона, включает в себя контроль технического состояния всех несущих элементов конструкции пассажирского вагона с восстановлением их назначенного ресурса, замену или восстановление любых его составных частей, включая базовые, и проведение комплекса работ по модернизации пассажирского вагона, включая обновление внутреннего оборудования и интерьера;

капитально-восстановительный ремонт (КВР) – производится для продления установленного срока службы пассажирского вагона с использованием восстановленных конструкций кузовов и тележек, обновлением внутреннего оборудования и созданием современного интерьера.

Отметим, что КРМ и КВР являются специализированными видами ремонта пассажирского вагона.

Постановка пассажирского вагона на КРМ производится по решению владельца вагона в сроки, установленные для КР-2; постановка на КВР – по истечении назначенного срока службы по решению владельца вагона.

Периодичность проведения ТО-3 и ДР зависит от типа пассажирского вагона по комбинированному критерию – показателям, учитывающим фактически выполненный объем работы в километрах пробега, и календарную продолжительность использования пассажирского вагона [от постройки, планового ТО (ТО-3) или ремонта до момента подачи пассажирского вагона в первый или последующие виды планового ТО и ремонта].

Капитальный ремонт осуществляется по критерию календарной продолжительности использования пассажирского вагона (таблица 6.3):

КР-1 – от постройки или предшествующего КР;

КР-2 – от постройки.

Таблица 6.3 – Нормативы периодичности проведения капитальных ремонтов пассажирских вагонов

| Тип вагона | Периодичность, лет | | | | | |
|---|--------------------|------|---------------|------|------|-----|
| | КР-1 | КР-1 | КР-2 (КРМ) | КР-1 | КР-1 | КВР |
| Вагоны для перевозки пассажиров с назначенным сроком службы до 28 лет | 6 | 6 | 18 | 5 | – | 28 |
| Вагоны всех типов с назначенным сроком службы 40 лет | 8 | 6 | 20 | 8 | 6 | –8 |
| Вагоны для скоростей 141–200 км/ч) | 6 | 5 | 16 | 5 | 5 | –8 |

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Значения интегральной функции $F_0(x)$

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz$$

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| x | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,0 | 0,500 | 504 | 508 | 512 | 516 | 520 | 524 | 528 | 532 | 536 |
| 0,1 | 0,540 | 544 | 548 | 552 | 556 | 560 | 564 | 568 | 571 | 575 |
| 0,2 | 0,579 | 583 | 587 | 591 | 595 | 599 | 603 | 606 | 610 | 614 |
| 0,3 | 0,618 | 622 | 626 | 629 | 633 | 637 | 641 | 644 | 648 | 652 |
| 0,4 | 0,655 | 659 | 663 | 666 | 670 | 674 | 677 | 681 | 684 | 688 |
| 0,5 | 0,691 | 695 | 699 | 702 | 705 | 709 | 712 | 716 | 719 | 722 |
| 0,6 | 0,726 | 729 | 732 | 736 | 739 | 742 | 745 | 749 | 752 | 755 |
| 0,7 | 0,758 | 761 | 764 | 767 | 770 | 773 | 776 | 779 | 782 | 785 |
| 0,8 | 0,788 | 791 | 794 | 797 | 800 | 802 | 805 | 808 | 811 | 813 |
| 0,9 | 0,816 | 819 | 821 | 824 | 826 | 829 | 831 | 834 | 837 | 839 |
| 1,0 | 0,841 | 844 | 846 | 849 | 851 | 853 | 855 | 858 | 860 | 862 |
| 1,1 | 0,864 | 867 | 869 | 871 | 873 | 875 | 877 | 879 | 881 | 883 |
| 1,2 | 0,885 | 887 | 889 | 891 | 893 | 894 | 896 | 898 | 900 | 902 |
| 1,3 | 0,903 | 905 | 907 | 908 | 910 | 911 | 913 | 915 | 916 | 918 |
| 1,4 | 0,919 | 921 | 922 | 924 | 925 | 926 | 929 | 929 | 931 | 932 |
| 1,5 | 0,933 | 934 | 936 | 937 | 938 | 939 | 941 | 942 | 943 | 944 |
| 1,6 | 0,945 | 946 | 947 | 948 | 950 | 951 | 952 | 953 | 954 | 955 |
| 1,7 | 0,955 | 956 | 957 | 958 | 959 | 960 | 961 | 962 | 962 | 963 |
| 1,8 | 0,964 | 965 | 966 | 966 | 967 | 968 | 969 | 969 | 970 | 971 |
| 1,9 | 0,971 | 972 | 973 | 973 | 974 | 974 | 975 | 976 | 976 | 977 |
| 2,0 | 0,9777 | 978 | 978 | 979 | 979 | 980 | 980 | 981 | 981 | 982 |
| 2,1 | 0,982 | 983 | 983 | 983 | 984 | 984 | 985 | 985 | 985 | 986 |
| 2,2 | 0,986 | 986 | 987 | 987 | 987 | 988 | 988 | 988 | 989 | 989 |
| 2,3 | 0,989 | 990 | 990 | 990 | 990 | 991 | 991 | 991 | 991 | 992 |
| 2,4 | 0,992 | 992 | 992 | 992 | 993 | 993 | 993 | 993 | 993 | 994 |
| 2,5 | 0,994 | 994 | 994 | 994 | 994 | 995 | 995 | 995 | 995 | 995 |
| 2,6 | 0,995 | 995 | 995 | 996 | 996 | 996 | 996 | 996 | 996 | 996 |
| 2,7 | 0,995 | 995 | 995 | 996 | 996 | 996 | 996 | 996 | 996 | 996 |
| 2,8 | 0,997 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 |
| 2,9 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 | 998 |
| 3,0 | 99865 | 999 | 999 | 999 | 999 | 999 | 999 | 999 | 999 | 999 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)

Значения функций распределения $\Phi(t)$ и $\varphi(t)$

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-z^2/2} dz ; \quad \varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2}$$

| x | $\Phi(x)$ | $\varphi(x)$ | x | $\Phi(x)$ | $\varphi(x)$ |
|------|-----------|--------------|------|-----------|--------------|
| 0,00 | 0,000000 | 0,398942 | 0,45 | 0,173648 | 0,360527 |
| 01 | 003989 | 396922 | 46 | 177242 | 358890 |
| 02 | 007978 | 308662 | 47 | 180822 | 357225 |
| 03 | 011966 | 308763 | 48 | 184386 | 355533 |
| 04 | 015953 | 398623 | 49 | 187933 | 353812 |
| 05 | 019039 | 308444 | 0,50 | 191462 | 351005 |
| 06 | 023022 | 398225 | 51 | 104674 | 350292 |
| 07 | 027903 | 397966 | 52 | 108168 | 340493 |
| 08 | 031881 | 307008 | 53 | 201044 | 346668 |
| 09 | 035856 | 307330 | 54 | 205101 | 344818 |
| 10 | 039828 | 396053 | 55 | 208840 | 342944 |
| 11 | 043795 | 306636 | 56 | 212260 | 341046 |
| 12 | 047758 | 396080 | 57 | 215661 | 339124 |
| 13 | 051717 | 395585 | 58 | 219043 | 337180 |
| 14 | 055670 | 395052 | 59 | 222405 | 335213 |
| 15 | 059618 | 304470 | 60 | 225747 | 333225 |
| 16 | 063559 | 393868 | 61 | 229069 | 331215 |
| 17 | 067495 | 303213 | 62 | 232371 | 329184 |
| 18 | 071424 | 392531 | 63 | 235653 | 327133 |
| 19 | 075345 | 391606 | 64 | 238914 | 325062 |
| 20 | 079260 | 391043 | 63 | 242154 | 322972 |
| 21 | 083166 | 390242 | 66 | 245373 | 320864 |
| 22 | 087064 | 339404 | 67 | 248571 | 318737 |
| 23 | 090954 | 388529 | 68 | 251748 | 316593 |
| 24 | 094835 | 387617 | 69 | 254903 | 314432 |
| 25 | 098706 | 386668 | 70 | 256036 | 312254 |
| 26 | 102568 | 385683 | 71 | 261148 | 310060 |
| 27 | 106420 | 384663 | 72 | 264238 | 307851 |
| 28 | 110261 | 383606 | 73 | 267305 | 305627 |
| 29 | 114092 | 382515 | 74 | 270350 | 303389 |
| 30 | 117911 | 381388 | 75 | 273373 | 301137 |
| 31 | 121750 | 300226 | 76 | 276373 | 298872 |
| 32 | 125516 | 379031 | 77 | 279350 | 296595 |
| 33 | 129300 | 377801 | 78 | 282305 | 294305 |
| 34 | 133072 | 376537 | 79 | 285236 | 292004 |
| 35 | 136831 | 375240 | 80 | 288145 | 289692 |
| 36 | 140576 | 373911 | 81 | 201030 | 287369 |
| 37 | 144300 | 372548 | 82 | 293892 | 285036 |
| 38 | 148027 | 371164 | 83 | 296731 | 282694 |
| 39 | 161732 | 369728 | 84 | 299546 | 280344 |
| 40 | 155422 | 868270 | 85 | 305337 | 277985 |
| 41 | 159097 | 366782 | 86 | 305105 | 275618 |
| 42 | 162757 | 366263 | 87 | 307860 | 273244 |
| 43 | 166102 | 363714 | 88 | 310670 | 270864 |
| 44 | 170031 | 362135 | 89 | 313267 | 268477 |

Продолжение приложения Б

| x | $\Phi(x)$ | $\varphi(x)$ | x | $\Phi(x)$ | $\varphi(x)$ |
|------|-----------|--------------|------|-----------|--------------|
| 0,90 | 0,316940 | 0,266085 | 1,45 | 0,426471 | 0,139131 |
| 91 | 318589 | 263688 | 46 | 427855 | 137417 |
| 92 | 321214 | 261286 | 47 | 429219 | 135418 |
| 93 | 323814 | 258881 | 48 | 430663 | 133435 |
| 94 | 326391 | 256471 | 49 | 431888 | 131468 |
| 95 | 328944 | 264059 | 1,50 | 433193 | 159518 |
| 96 | 331472 | 261644 | 51 | 434478 | 127583 |
| 97 | 333977 | 249228 | 52 | 435745 | 125665 |
| 98 | 336457 | 246809 | 53 | 436992 | 123763 |
| 99 | 338913 | 244390 | 54 | 438220 | 121878 |
| 1,00 | 341315 | 241971 | 55 | 439429 | 120009 |
| 01 | 343752 | 239551 | 56 | 440620 | 118157 |
| 02 | 340136 | 237132 | 57 | 441792 | 116323 |
| 03 | 348495 | 234714 | 58 | 442947 | 114505 |
| 04 | 360830 | 232297 | 59 | 444083 | 112704 |
| 05 | 353141 | 229882 | 60 | 415201 | 110921 |
| 06 | 355428 | 227470 | 61 | 446301 | 109155 |
| 07 | 367690 | 225060 | 62 | 447384 | 107406 |
| 08 | 359929 | 222053 | 63 | 448449 | 105675 |
| 09 | 362143 | 220251 | 64 | 449497 | 103961 |
| 10 | 304334 | 217852 | 65 | 450529 | 102265 |
| 11 | 366500 | 215458 | 66 | 451543 | 100586 |
| 12 | 368643 | 213069 | 67 | 452540 | 98925 |
| 13 | 370762 | 210686 | 68 | 453521 | 97282 |
| 14 | 372857 | 208308 | 69 | 454186 | 95657 |
| 15 | 374928 | 205936 | 70 | 455435 | 94049 |
| 16 | 376976 | 203671 | 71 | 456367 | 92459 |
| 17 | 379000 | 201214 | 72 | 457284 | 90887 |
| 18 | 381000 | 198863 | 73 | 458185 | 89333 |
| 19 | 382977 | 196620 | 74 | 459070 | 87796 |
| 20 | 381930 | 194186 | 75 | 459941 | 86277 |
| 21 | 386861 | 191890 | 76 | 460796 | 84776 |
| 22 | 388768 | 189543 | 77 | 461636 | 83293 |
| 23 | 390651 | 187235 | 78 | 462462 | 81828 |
| 24 | 392512 | 184937 | 79 | 463273 | 80380 |
| 25 | 394350 | 182649 | 80 | 464070 | 78950 |
| 26 | 396105 | 180371 | 81 | 464852 | 77538 |
| 27 | 397958 | 178104 | 82 | 465620 | 76143 |
| 28 | 399727 | 176817 | 83 | 466375 | 74766 |
| 29 | 401475 | 173602 | 84 | 467116 | 73407 |
| 30 | 403200 | 171369 | 85 | 467843 | 72065 |
| 31 | 404902 | 169147 | 86 | 468557 | 70740 |
| 32 | 406582 | 166937 | 87 | 469258 | 69433 |
| 33 | 408241 | 164740 | 88 | 469910 | 68144 |
| 34 | 409877 | 162555 | 89 | 470621 | 66871 |
| 35 | 411492 | 160383 | 90 | 471283 | 65616 |
| 36 | 413085 | 158225 | 91 | 471933 | 64378 |
| 37 | 414657 | 156080 | 92 | 472671 | 63157 |
| 38 | 416207 | 153948 | 93 | 473197 | 61952 |
| 39 | 417736 | 151831 | 94 | 473810 | 60765 |
| 40 | 419243 | 149727 | 95 | 474412 | 59595 |
| 41 | 420730 | 147639 | 96 | 475002 | 58441 |
| 42 | 422196 | 145564 | 97 | 475581 | 57304 |
| 43 | 423641 | 143505 | 98 | 476148 | 56183 |
| 44 | 425066 | 141460 | 99 | 476705 | 55079 |

Продолжение приложения Б

| x | $\Phi(x)$ | $\varphi(x)$ | x | $\Phi(x)$ | $\varphi(x)$ |
|------|-----------|--------------|------|-----------|--------------|
| 2,00 | 0,477250 | 0,053991 | 2,50 | 0,493790 | 0,017528 |
| 01 | 477784 | 052919 | 51 | 493963 | 017095 |
| 02 | 478308 | 051825 | 52 | 494132 | 016670 |
| 03 | 478822 | 050824 | 53 | 494297 | 016254 |
| 04 | 479325 | 019800 | 54 | 4944157 | 015818 |
| 05 | 479818 | 048792 | 55 | 494614 | 015449 |
| 06 | 480301 | 017800 | 56 | 494766 | 015060 |
| 07 | 480774 | 046823 | 57 | 494915 | 011678 |
| 08 | 481237 | 01,5861 | 58 | 495060 | 014305 |
| 09 | 481691 | 044915 | 59 | 495201 | 013940 |
| 10 | 482136 | 043984 | 60 | 495339' | 013583 |
| 11 | 482571 | 043067 | 61 | 495173 | 013234 |
| 12 | 482997 | 042166 | 62 | 495604 | 012892 |
| 13 | 483414 | 041280 | 63 | 495731 | 012558 |
| 14 | 483823 | 040408 | 64 | 495655 | 012232 |
| 15 | 481222 | 039550 | 65 | 495975 | 011012 |
| 16 | 484614 | 038707 | 66 | 496093 | 011600 |
| 17 | 484997 | 037878 | 67 | 496207 | 011295 |
| 18 | 485371 | 037063 | 68 | 496319 | 010987 |
| 19 | 486738 | 036262 | 69 | 496427 | 010706 |
| 20 | 486097 | 035475 | 70 | 496533 | 010121 |
| 21 | 486447 | 034701 | 71 | 496636 | 010143 |
| 22 | 486791 | 033941 | 72 | 496736. | 009871 |
| 23 | 487126 | 033194 | 73 | 49Я833 | 009606 |
| 24 | 487455 | 032460 | 74 | 496928 | 009347 |
| 25 | 487776 | 031740 | 75 | 497020 | 009094 |
| 26 | 488089 | 031032 | 76 | 497110 | 008846 |
| 27 | 488396 | 030337 | 77 | 497137 | 008605 |
| 28 | 488696 | 029655 | 78 | 497282 | 008370 |
| 29 | 488989 | 028985 | 79 | 497365 | 008140 |
| 30 | 489276 | 028327 | 80 | 497445 | 007915 |
| 31 | 489650 | 027682 | 81 | 497523 | 007697 |
| 32 | 489830 | 027048 | 82 | 497599 | 007483 |
| 33 | 490097 | 026426 | 83 | 497673 | 007274 |
| 34 | 490358 | 025817 | 84 | 497744 | 007071 |
| 35 | 490613 | 026218 | 85 | 407814 | 006873 |
| 36 | 490863 | 024631 | 86 | 497882 | 006679 |
| 37 | 491106 | 024056 | 87 | 197948 | 006491 |
| 38 | 491344 | 023491 | 88 | 498012 | 006307 |
| 39 | 491576 | 022937 | 89 | 408074 | 006127 |
| 40 | 491802 | 022395 | 90 | 498134 | 005953 |
| 41 | 492024 | 021862 | 91 | 498193 | 005782 |
| 42 | 492240 | 021341 | 92 | 498250 | 005616 |
| 43 | 492451 | 020829 | 93 | 49K305 | 005454 |
| 44 | 492656 | 020328 | 94 | 498359 | 005296 |
| 45 | 492857 | 019837 | 95 | 498411 | 006143 |
| 46 | 493053 | 019366 | 96 | 498462 | 004993 |
| 47 | 493244 | 018885 | 97 | 498511 | 004847 |
| 48 | 483431 | 018423 | 98 | 498559 | 004705 |
| 49 | 493613 | 017971 | 99 | 498605 | 004664 |

Окончание приложения Б

| x | $\Phi(x)$ | $\varphi(x)$ | x | $\Phi(x)$ | $\varphi(x)$ |
|------|-----------|--------------|------|-------------------------|--------------|
| 3,00 | 0,498650 | 0,004432 | 3,50 | 0,499767 | 0,0110873 |
| 01 | 498694 | 004301 | 51 | 499776 | 000843 |
| 02 | 498736 | 004173 | 52 | 499784 | 000814 |
| 03 | 498777 | 004049 | 53 | 499792 | 000785 |
| 04 | 498817 | 003928 | 54 | 499800 | 000758 |
| 05 | 498856 | 003810 | 55 | 499807 | 000732 |
| 06 | 498893 | 003695 | 56 | 499815 | 000706 |
| 07 | 498930 | 003684 | 57 | 499822 | 000681 |
| 08 | 498966 | 003475 | 58 | 499828 | 000657 |
| 09 | 498999 | 003370 | 59 | 499835 | 000634 |
| 10 | 499032 | 003267 | 60 | 499841 | 000612 |
| 11 | 499066 | 003167 | 61 | 499847 | 000590 |
| 12 | 499096 | 003070 | 62 | 499853 | 000569 |
| 13 | 499126 | 002976 | 63 | 499858 | 000549 |
| 14 | 499185 | 002884 | 64 | 499864 | 000529 |
| 15 | 499184 | 002794 | 65 | 499869 | 000510 |
| 16 | 499211 | 002707 | 66 | 499874 | 000492 |
| 17 | 499238 | 002623 | 67 | 499879 | 000474 |
| 18 | 499264 | 002541 | 68 | 499883 | 000457 |
| 19 | 499289 | 002161 | 69 | 499888 | 000441 |
| 20 | 499313 | 002384 | 70 | 499842 | 000425 |
| 21 | 499336 | 002309 | 71 | 499806 | 000109 |
| 22 | 499369 | 002236 | 72 | 499900 | 000394 |
| 23 | 499381 | 002165 | 73 | 499904 | 000380 |
| 24 | 499402 | 002096 | 74 | 499908 | 000366 |
| 25 | 499423 | 002029 | 75 | 499912 | 000353 |
| 26 | 409441 | 001964 | 76 | 499915 | 000340 |
| 27 | 499402 | 001901 | 77 | 499918 | 000327 |
| 28 | 499481 | 001840 | 78 | 499922 | 000315 |
| 29 | 499199 | 001780 | 79 | 499925 | 000303 |
| 30 | 499517 | 001723 | 80 | 499928 | 000292 |
| 31 | 499634 | 001667 | 81 | 499931 | 000281 |
| 32 | 499560 | 001612 | 82 | 499933 | 000271 |
| 33 | 499666 | 001560 | 83 | 499936 | 000260 |
| 34 | 499581 | 001508 | 84 | 499938 | 000251 |
| 35 | 499698 | 001459 | 85 | 499941 | 000241 |
| 36 | 499610 | 001411 | 86 | 499943 | 000232 |
| 37 | 499624 | 001364 | 87 | 499946 | 000223 |
| 38 | 499638 | 001319 | 88 | 499948 | 000215 |
| 39 | 499661 | 001276 | 89 | 499950 | 000207 |
| 40 | 499663 | 001232 | 3,9 | 0,49 ⁷ 75952 | 0,000199 |
| 41 | 499676 | 001191 | 4,0 | 0,49 ⁷ 84164 | 0,000134 |
| 42 | 499687 | 001151 | 4,1 | 0,49 ⁸ 89671 | 0,000097 |
| 43 | 499698 | 001112 | 4,2 | 0,49 ⁴ 3327 | 0,000059 |
| 44 | 499709 | 001075 | 4,4 | 0,49 ⁴ 7294 | 0,000026 |
| 45 | 499720 | 001038 | 4,7 | 0,49 ² 3496 | 0,000006 |
| 46 | 499730 | 001003 | 5,0 | 0,49 ² 8567 | 0,000001 |
| 47 | 499740 | 000969 | | | |
| 48 | 499749 | 000936 | | | |
| 49 | 499768 | 000904 | | | |

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(справочное)

Квантили нормированного нормального распределения

| $P(t) = \gamma$ | u_γ | $P(t) = \gamma$ | u_γ | $P(t) = \gamma$ | u_γ |
|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|
| 0,50 | 0,000 | 0,70 | 0,524 | 0,90 | 1,282 |
| 51 | 0,025 | 71 | 0,553 | 91 | 1,341 |
| 52 | 0,050 | 72 | 0,583 | 92 | 1,405 |
| 53 | 0,075 | 73 | 0,613 | 925 | 1,440 |
| 54 | 0,100 | 74 | 0,643 | 93 | 1,476 |
| 55 | 0,126 | 75 | 0,674 | 94 | 1,555 |
| 56 | 0,151 | 76 | 0,706 | 95 | 1,645 |
| 57 | 0,176 | 77 | 0,739 | 96 | 1,751 |
| 58 | 0,202 | 78 | 0,772 | 97 | 1,881 |
| 59 | 0,228 | 79 | 0,806 | 975 | 1,960 |
| 0,60 | 0,253 | 0,80 | 0,842 | 980 | 2,054 |
| 61 | 0,279 | 81 | 0,878 | 990 | 2,326 |
| 62 | 0,305 | 82 | 0,915 | 991 | 2,366 |
| 63 | 0,332 | 83 | 0,954 | 992 | 2,409 |
| 64 | 0,358 | 84 | 0,994 | 993 | 2,457 |
| 65 | 0,385 | 85 | 1,036 | 994 | 2,512 |
| 66 | 0,412 | 86 | 1,080 | 995 | 2,576 |
| 67 | 0,440 | 87 | 1,126 | 996 | 2,652 |
| 68 | 0,468 | 88 | 1,175 | 997 | 2,748 |
| 69 | 0,496 | 89 | 1,227 | 9975 | 2,807 |
| | | | | 9980 | 2,878 |
| | | | | 9990 | 3,090 |

Коэффициенты Ирвина λ_T

| Повторяемость информации N | λ_T | | Повторяемость информации N | λ_T | |
|------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|
| | при $\alpha = 0,95$ | при $\alpha = 0,99$ | | при $\alpha = 0,95$ | при $\alpha = 0,99$ |
| 2 | 2,8 | 3,7 | 30 | 1,2 | 1,7 |
| 3 | 2,2 | 2,9 | 50 | 1,1 | 1,6 |
| 10 | 1,5 | 2,0 | 100 | 1,0 | 1,5 |
| 20 | 1,3 | 1,8 | 400 | 0,9 | 1,3 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(справочное)
Значения функции e^{-x}

| x | e^{-x} | x | e^{-x} | x | e^{-x} | x | e^{-x} | x | e^{-x} |
|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|
| 0,00 | 1,0000 | 0,35 | 0,7047 | 0,70 | 0,4966 | 1,05 | 0,3499 | 1,40 | 0,2466 |
| 0,01 | 0,9900 | 0,36 | 0,6977 | 0,71 | 0,4916 | 1,06 | 0,3465 | 1,41 | 0,2441 |
| 0,02 | 0,9802 | 0,37 | 0,6907 | 0,72 | 0,4868 | 1,07 | 0,3430 | 1,42 | 0,2417 |
| 0,03 | 0,9704 | 0,38 | 0,6839 | 0,73 | 0,4819 | 1,08 | 0,3396 | 1,43 | 0,2393 |
| 0,04 | 0,9608 | 0,39 | 0,6771 | 0,74 | 0,4771 | 1,09 | 0,3362 | 1,44 | 0,2369 |
| 0,05 | 0,9512 | 0,40 | 0,6703 | 0,75 | 0,4724 | 1,10 | 0,3329 | 1,45 | 0,2346 |
| 0,06 | 0,9418 | 0,41 | 0,6637 | 0,76 | 0,4674 | 1,11 | 0,3296 | 1,46 | 0,2322 |
| 0,07 | 0,9324 | 0,42 | 0,6570 | 0,77 | 0,4630 | 1,12 | 0,3263 | 1,47 | 0,2299 |
| 0,08 | 0,9231 | 0,43 | 0,6505 | 0,78 | 0,4584 | 1,13 | 0,3230 | 1,48 | 0,2276 |
| 0,09 | 0,9139 | 0,44 | 0,6440 | 0,79 | 0,4538 | 1,14 | 0,3198 | 1,49 | 0,2254 |
| 0,10 | 0,9048 | 0,45 | 0,6376 | 0,80 | 0,4493 | 1,15 | 0,3166 | 1,50 | 0,2231 |
| 0,11 | 0,8958 | 0,46 | 0,6313 | 0,81 | 0,4449 | 1,16 | 0,3135 | 1,51 | 0,2209 |
| 0,12 | 0,8869 | 0,47 | 0,6250 | 0,82 | 0,4404 | 1,17 | 0,3104 | 1,52 | 0,2187 |
| 0,13 | 0,8781 | 0,48 | 0,6188 | 0,83 | 0,4360 | 1,18 | 0,3073 | 1,53 | 0,2165 |
| 0,14 | 0,8694 | 0,49 | 0,6126 | 0,84 | 0,4317 | 1,19 | 0,3042 | 1,54 | 0,2144 |
| 0,15 | 0,8607 | 0,50 | 0,6065 | 0,85 | 0,4274 | 1,20 | 0,3012 | 1,55 | 0,2122 |
| 0,16 | 0,8521 | 0,51 | 0,6005 | 0,86 | 0,4232 | 1,21 | 0,2982 | 1,56 | 0,2101 |
| 0,17 | 0,8437 | 0,52 | 0,5945 | 0,87 | 0,4190 | 1,22 | 0,2952 | 1,57 | 0,2080 |
| 0,18 | 0,8353 | 0,53 | 0,5886 | 0,88 | 0,4148 | 1,23 | 0,2923 | 1,58 | 0,2060 |
| 0,19 | 0,8270 | 0,54 | 0,5827 | 0,89 | 0,4107 | 1,24 | 0,2894 | 1,59 | 0,2039 |
| 0,20 | 0,8187 | 0,55 | 0,5769 | 0,90 | 0,4066 | 1,25 | 0,2865 | 1,60 | 0,2019 |
| 0,21 | 0,8106 | 0,56 | 0,5712 | 0,91 | 0,4025 | 1,26 | 0,2837 | 1,61 | 0,1999 |
| 0,22 | 0,8025 | 0,57 | 0,5655 | 0,92 | 0,3985 | 1,27 | 0,2808 | 1,62 | 0,1979 |
| 0,23 | 0,7945 | 0,58 | 0,5599 | 0,93 | 0,3946 | 1,28 | 0,2780 | 1,63 | 0,1959 |
| 0,24 | 0,7866 | 0,59 | 0,5543 | 0,94 | 0,3906 | 1,29 | 0,2753 | 1,64 | 0,1940 |
| 0,25 | 0,7788 | 0,60 | 0,5488 | 0,95 | 0,3867 | 1,30 | 0,2725 | 1,65 | 0,1920 |
| 0,26 | 0,7711 | 0,61 | 0,5434 | 0,96 | 0,3829 | 1,31 | 0,2698 | 1,66 | 0,1901 |
| 0,27 | 0,7634 | 0,62 | 0,5379 | 0,97 | 0,3791 | 1,32 | 0,2761 | 1,67 | 0,1882 |
| 0,28 | 0,7558 | 0,63 | 0,5326 | 0,98 | 0,3753 | 1,33 | 0,2645 | 1,68 | 0,1864 |
| 0,29 | 0,7483 | 0,64 | 0,5273 | 0,99 | 0,3716 | 1,34 | 0,2618 | 1,69 | 0,1845 |
| 0,30 | 0,7408 | 0,65 | 0,5220 | 1,00 | 0,3679 | 1,35 | 0,2592 | 1,70 | 0,1827 |
| 0,31 | 0,7334 | 0,66 | 0,5169 | 1,01 | 0,3642 | 1,36 | 0,2567 | 1,71 | 0,1809 |
| 0,32 | 0,7189 | 0,67 | 0,5117 | 1,02 | 0,3606 | 1,37 | 0,2541 | 1,72 | 0,1791 |
| 0,33 | 0,7189 | 0,68 | 0,5066 | 1,03 | 0,3570 | 1,38 | 0,2516 | 1,73 | 0,1773 |
| 0,34 | 0,7118 | 0,69 | 0,5016 | 1,04 | 0,3535 | 1,39 | 0,2491 | 1,74 | 0,1755 |

Окончание приложения Г

| x | e^{-x} | x | e^{-x} | x | e^{-x} | x | e^{-x} | x | e^{-x} |
|------|----------|------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| 1,75 | 0,1738 | 1,90 | 0,1496 | 2,5 | 0,0821 | 4,0 | 0,0183 | 5,5 | 0,0041 |
| 1,76 | 0,1720 | 1,91 | 0,1481 | 2,6 | 0,0743 | 4,1 | 0,0166 | 5,6 | 0,0037 |
| 1,77 | 0,1703 | 1,92 | 0,1466 | 2,7 | 0,0672 | 4,2 | 0,0150 | 5,7 | 0,0033 |
| 1,78 | 0,1686 | 1,93 | 0,1451 | 2,8 | 0,0608 | 4,3 | 0,0136 | 5,8 | 0,0030 |
| 1,79 | 0,1670 | 1,94 | 0,1437 | 2,9 | 0,0550 | 4,4 | 0,0213 | 5,9 | 0,0027 |
| 1,80 | 0,1653 | 1,95 | 0,1423 | 3,0 | 0,0498 | 4,5 | 0,0111 | 6,0 | 0,0025 |
| 1,81 | 0,1637 | 1,96 | 0,1409 | 3,1 | 0,0451 | 4,6 | 0,0101 | 6,1 | 0,0022 |
| 1,82 | 0,1620 | 1,97 | 0,1395 | 3,2 | 0,0408 | 4,7 | 0,0091 | 6,2 | 0,0020 |
| 1,83 | 0,1604 | 1,98 | 0,1381 | 3,3 | 0,0369 | 4,8 | 0,0082 | 6,3 | 0,0018 |
| 1,84 | 0,1588 | 1,99 | 0,1367 | 3,4 | 0,0334 | 4,9 | 0,0074 | 6,4 | 0,0018 |
| 1,85 | 0,1572 | 2,00 | 0,1353 | 3,5 | 0,0302 | 5,0 | 0,0067 | 6,5 | 0,0015 |
| 1,86 | 0,1557 | 2,1 | 0,1225 | 3,6 | 0,0273 | 5,1 | 0,0061 | 6,6 | 0,0014 |
| 1,87 | 0,1541 | 2,2 | 0,1108 | 3,7 | 0,0247 | 5,2 | 0,0055 | 6,7 | 0,0012 |
| 1,88 | 0,1526 | 2,3 | 0,1003 | 3,8 | 0,0224 | 5,3 | 0,0050 | 6,8 | 0,0011 |
| 1,89 | 0,1511 | 2,4 | 0,0907 | 3,9 | 0,0202 | 5,4 | 0,0045 | 6,9 | 0,0010 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(справочное)
Значения гамма функции $\Gamma(x)$

| x | $\Gamma(x)$ | x | $\Gamma(x)$ | x | $\Gamma(x)$ | x | $\Gamma(x)$ |
|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| 1,00 | 1,0000 | 1,25 | 0,9064 | 1,50 | 0,8862 | 1,75 | 0,9191 |
| 1,01 | 0,9943 | 1,26 | 0,9044 | 1,51 | 0,8866 | 1,76 | 0,9214 |
| 1,02 | 0,9888 | 1,27 | 0,9025 | 1,52 | 0,8870 | 1,77 | 0,9238 |
| 1,03 | 0,9835 | 1,28 | 0,9007 | 1,53 | 0,8876 | 1,78 | 0,9262 |
| 1,04 | 0,9784 | 1,29 | 0,8990 | 1,54 | 0,8882 | 1,79 | 0,9288 |
| 1,05 | 0,9735 | 1,30 | 0,8975 | 1,55 | 0,8889 | 1,80 | 0,9314 |
| 1,06 | 0,9687 | 1,31 | 0,8960 | 1,56 | 0,8896 | 1,81 | 0,9341 |
| 1,07 | 0,9642 | 1,32 | 0,8946 | 1,57 | 0,8905 | 1,82 | 0,9368 |
| 1,08 | 0,9597 | 1,33 | 0,8934 | 1,58 | 0,8914 | 1,83 | 0,9397 |
| 1,09 | 0,9555 | 1,34 | 0,8922 | 1,59 | 0,8924 | 1,84 | 0,9426 |
| 1,10 | 0,9514 | 1,35 | 0,8912 | 1,60 | 0,8935 | 1,85 | 0,9456 |
| 1,11 | 0,9474 | 1,36 | 0,8902 | 1,61 | 0,8947 | 1,86 | 0,9487 |
| 1,12 | 0,9436 | 1,37 | 0,8893 | 1,62 | 0,8959 | 1,87 | 0,9518 |
| 1,13 | 0,9399 | 1,38 | 0,8885 | 1,63 | 0,8972 | 1,88 | 0,9551 |
| 1,14 | 0,9364 | 1,39 | 0,8879 | 1,64 | 0,8986 | 1,89 | 0,9584 |
| 1,15 | 0,9330 | 1,40 | 0,8873 | 1,65 | 0,9001 | 1,90 | 0,9618 |
| 1,16 | 0,9298 | 1,41 | 0,8868 | 1,66 | 0,9017 | 1,91 | 0,9652 |
| 1,17 | 0,9267 | 1,42 | 0,8864 | 1,67 | 0,9033 | 1,92 | 0,9688 |
| 1,18 | 0,9237 | 1,43 | 0,8860 | 1,68 | 0,9050 | 1,93 | 0,9724 |
| 1,19 | 0,9209 | 1,44 | 0,8858 | 1,69 | 0,9068 | 1,94 | 0,9761 |
| 1,20 | 0,9182 | 1,45 | 0,8857 | 1,70 | 0,9086 | 1,95 | 0,9799 |
| 1,21 | 0,9156 | 1,46 | 0,8856 | 1,71 | 0,9106 | 1,96 | 0,9837 |
| 1,22 | 0,9131 | 1,47 | 0,8856 | 1,72 | 0,9126 | 1,97 | 0,9877 |
| 1,23 | 0,9108 | 1,48 | 0,8857 | 1,73 | 0,9147 | 1,98 | 0,9917 |
| 1,24 | 0,9085 | 1,49 | 0,8859 | 1,74 | 0,9168 | 1,99 | 0,9958 |
| 0,5 | 1,7725 | 2,5 | 1,3294 | 4,5 | 11,632 | 6,5 | 287,88 |
| 1 | 1 | 3 | 2 | 5 | 24 | 7 | 720 |
| 1,5 | 0,8862 | 3,5 | 3,3233 | 5,5 | 52,342 | 7,5 | 1871,2 |
| 2 | 1 | 4 | 6 | 6 | 120 | 8 | 5040 |

ПРИЛОЖЕНИЕ E
(обязательное)

Точечная оценка параметра экспоненциального распределения

Точечную оценку параметра экспоненциального распределения λ вычисляют по формулам таблицы E.1.

Таблица E.1 – Формулы для вычисления точечной оценки параметра экспоненциального распределения

| План испытаний | Оценка параметра λ |
|--|---|
| [NUM] | $\frac{N-1}{N}, \quad N > 1$ $\sum_{i=1}^N t_i$ |
| [Nur] | $\frac{r-1}{\sum_{i=1}^r t_i + (N-r) \cdot t_r}, \quad r > 1$ |
| [NUT] | $\frac{d}{\sum_{i=1}^d t_i - (N-d) \cdot T}, \quad d > 1$ |
| [NMr] | $\frac{r}{Nt_r}$ |
| [NMT] | $\frac{d}{NT}$ |
| <p>Примечания</p> <p>r – заданное число отказавших изделий (для плана [Nur]) или заданное число отказов (предельных состояний) (для планов [NMr], [NRr]), при достижении которых испытания (наблюдения) прекращают;</p> <p>d – число отказавших изделий (для плана [NUT]) или число отказов (предельных состояний) (для планов [NMT], [NRT]) за время испытаний (наблюдений) T;</p> <p>t_i – отдельное значение случайной величины (наработки до отказа);</p> <p>N – число испытываемых (наблюдаемых) изделий.</p> <p>Для планов наблюдений типа [NU...] и [NM...] величины r и d представляют собой число полных реализаций в выборке.</p> | |

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж
(обязательное)

Точечная оценка параметров распределения Вейбулла

Точечные оценки параметров a и b распределения Вейбулла для $N > 15$ и планов $[NUM]$, $[NUr]$ и $[NUT]$ вычисляются в зависимости от плана наблюдений методом максимального правдоподобия по следующим формулам.

Оценка параметра a :

- для плана $[NUM]$ –

$$\hat{a} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} \right)^{1/\hat{b}} ; \quad (\text{Ж.1})$$

- для планов $[NUT]$ и $[NUr]$ –

$$\hat{a} = \left\{ \left[\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}} + (N-m)t_m^{\hat{b}} \right] / m \right\}^{1/\hat{b}} , \quad (\text{Ж.2})$$

где m – число отказавших изделий на момент окончания испытаний: $m = r$ – для планов $[NUr]$, $[NMr]$, $[NRr]$, $m = d$ – для планов $[NUT]$, $[NMT]$, $[NRT]$;

t_m – наибольшая по значению наработка изделия на отказ на момент окончания испытаний (наблюдений): $t_m = t_r$ – для плана $[NUr]$, $t_m = t_d$ – для плана $[NUT]$.

Оценка параметра b :

- для плана $[NUM]$ –

$$\left(\frac{N}{\hat{b}} + \sum_{i=1}^N \ln t_i \right) \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} - N \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} \ln t_i = 0 ; \quad (\text{Ж.3})$$

- для планов $[NUT]$ и $[NUr]$ –

$$\left(\frac{m}{\hat{b}} + \sum_{i=1}^m \ln t_i \right) \left[\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}} + (N-m)t_m^{\hat{b}} \right] - m \left[\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}} \ln t_i + (N-m)t_m^{\hat{b}} \ln t_m \right] = 0. \quad \text{Ж.4}$$

Примечание – Для $N \leq 15$ и планов $[NUM]$, $[NUr]$ и $[NUT]$ оценки параметров a и b вычисляются по формулам, приведенным в РД 50-690–89, методом линейного оценивания.

Порядок решения уравнений (Ж.1) – (Ж.4) относительно параметров \hat{a} и \hat{b} методом последовательных приближений следующий [20].

1 Вычисляют коэффициент A :

$$A = \frac{\sum_{i=1}^m \ln t_i}{m}. \quad (\text{Ж.5})$$

2 Рассчитывают начальное приближение \hat{b}_0 :

$$\hat{b}_0 = \frac{m+1}{[A - \ln t_1](0,23m + 3,71)}. \quad (\text{Ж.6})$$

3 Определяют последующие приближения \hat{b}_k ($k = 1, 2, \dots$)

$$\hat{b}_k = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \ln t_i t_i^{\hat{b}_{k-1}} + \sum_{j=1}^n \ln \tau_j \tau_j^{\hat{b}_{k-1}}}{\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}_{k-1}} + \sum_{j=1}^n \tau_j^{\hat{b}_{k-1}}} - A \right)^{-1}, \quad (\text{Ж.7})$$

где m – число отказавших изделий (наработок до отказа) на момент окончания испытаний: $m = N$ – для плана $[NUN]$, $m = r$ – для плана $[NUr]$, $m = d$ – для плана $[NUT]$;

n – число безотказно проработавших изделий (число безотказных наработок) на момент окончания испытаний;

t_i – отдельные значения наработок до отказа, $i = \overline{1, m}$;

τ_j – отдельные значения безотказных наработок: $\tau_j = t_r$ – для плана $[NUr]$,

$\tau_j = T$ – для плана $[NUT]$.

Для однократно усеченной выборки

$$\hat{b}_k = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \ln t_i t_i^{\hat{b}_{k-1}} + n(\ln T \cdot T^{\hat{b}_{k-1}})}{\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}_{k-1}} + nT^{\hat{b}_{k-1}}} - A \right)^{-1}. \quad (\text{Ж.8})$$

4 Процесс нахождения приближений прекращают при выполнении условия

$$\left| \frac{\hat{b}_k - \hat{b}_{k-1}}{\hat{b}_{k-1}} \right| < \varepsilon. \quad (\text{Ж.9})$$

Значения относительной ошибки ε при оценке параметра b выбирают из ряда 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1. При этом, чем точнее результаты испытаний, тем меньше значение ε . Как правило, значение ε должно быть не менее 0,01.

Значение \hat{b}_k , удовлетворяющее неравенству (Ж.9), принимают в качестве оценки параметра b .

5 Найденное значение \hat{b} подставляют в выражения (Ж.1) или (Ж.2) для параметра \hat{a} .

ПРИЛОЖЕНИЕ И
(обязательное)

Точечная оценка параметров нормального распределения

Точечные оценки параметров нормального распределения μ и s для $N > 15$ вычисляются по формулам таблицы И.1 методом максимального правдоподобия.

Таблица И.1 – Формулы для вычисления точечных оценок параметров нормального распределения ($N > 15$)

| План испытаний | Расчетные формулы |
|--|---|
| [NUN] | $\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i ; \quad \hat{s} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \hat{\mu})^2 \cdot [E(N-1)]}$ |
| [NUr], [NUT] | $\sum_{i=1}^m \frac{t_i - \hat{\mu}}{\hat{s}} + (N-m) \frac{\varphi\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{s}}{F_0\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{s}}{\hat{s}}\right]}\right]}{F_0\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{s}}{\hat{s}}\right]} = 0 ;$ $m - \sum_{i=1}^m \frac{t_i - \hat{\mu}}{\hat{s}} + (N-m) \frac{\hat{\mu} - t_m}{\hat{s}} \cdot \frac{\varphi\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{s}}{F_0\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{s}}{\hat{s}}\right]}\right]}{F_0\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{s}}{\hat{s}}\right]} = 0$ |
| <p>Примечания</p> <p>$F_0(\dots)$ – функция нормального распределения (нормированного);</p> <p>$\varphi(\dots)$ – плотность вероятности нормального распределения (нормированного);</p> <p>$E(\dots)$ – коэффициент, учитывающий поправку на смещение при оценке параметра s.</p> <p>Значения функций $F_0(x)$, $\varphi(x)$ табулированы и приведены в приложениях А и Б, а значения коэффициентов $E(N-1)$ даны в РД 50-690–89.</p> | |

Для $N \leq 15$ оценки параметров μ и s вычисляются по формулам, приведенным в РД 50-690–89, методом линейного оценивания.

Рассмотрим порядок решения уравнений относительно параметров μ и s для планов испытаний [NUr] и [NUT] методом последовательных приближений [30].

1 Вычисляются вспомогательные коэффициенты с помощью формул, приведенных в таблице И.2.

Таблица И.2 – Формулы для вычисления вспомогательных коэффициентов

| Коэффициент | Расчетное выражение |
|-------------|---------------------------------------|
| A | $\sum_{i=1}^m t_i + 0.64(N-m)t_m$ |
| B | $m + 0.64(N-m)$ |
| C | $\sum_{i=1}^m t_i^2 + 0.64(N-m)t_m^2$ |
| D | $0.8(N-m)$ |
| E | $0.8(N-m)t_m$ |

2 Определяют начальные приближения $\hat{\mu}_0$ и \hat{s}_0 для оценок μ и s

$$\hat{s}_0 = \frac{E - A \left(\frac{D}{B} \right) + \sqrt{\left(E - A \frac{D}{B} \right)^2 + 4m \left(C - \frac{A^2}{B} \right)}}{2m}; \quad (\text{И.1})$$

$$\hat{\mu}_0 = \frac{A}{B} + \frac{D}{B} \hat{s}_0. \quad (\text{И.2})$$

3 Рассчитывают коэффициенты

$$\Delta_k = (N-m)\Delta'_k; \quad \Delta'_k = \lambda_k - 0,8 - 0,64d_k;$$

$$d_k = (t_m - \hat{\mu}_{k-1})/\hat{s}_{k-1}; \quad \lambda_k = \varphi(d_k)/[1 - F_0(d_k)]; \quad F_k = (N-m)\Delta'_k t_m.$$

4 Вычисляют последующие приближения $\hat{\mu}_k$ и \hat{s}_k для оценок μ и s

$$\hat{s}_k = \frac{E + F_k - A \left(\frac{D + \Delta_k}{B} \right) + \sqrt{\left[E + F_k - A \left(\frac{D + \Delta_k}{B} \right) \right]^2 + 4m \left(C - \frac{A^2}{B} \right)}}{2m}; \quad (\text{И.3})$$

$$\hat{\mu}_k = \frac{A}{B} + \left(\frac{D + \Delta_k}{B} \right) \hat{s}_k. \quad (\text{И.4})$$

За оценки параметров μ и s принимают значения $\hat{\mu}_k$ и \hat{s}_k , для которых соблюдаются условия

$$\left| \frac{\hat{\mu}_k - \hat{\mu}_{k-1}}{\hat{\mu}_{k-1}} \right| < \varepsilon \quad \text{и} \quad \left| \frac{\hat{s}_k - \hat{s}_{k-1}}{\hat{s}_{k-1}} \right| < \varepsilon. \quad (\text{И.5})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ К

(обязательное)

Интервальные оценки показателей надежности для основных распределений

В случае экспоненциального распределения интервальные оценки показателей надежности вычисляются по формулам таблицы К.1, а значения доверительных границ $\underline{\lambda}$, $\bar{\lambda}$ параметра λ – по формулам таблицы К.2 [30].

Таблица К.1 – Формулы для вычисления интервальных оценок показателей надежности для экспоненциального закона

| Наименование показателя надежности | Формулы для вычисления доверительных границ уровня q | |
|---|--|--|
| | нижней | верхней |
| Средние показатели | $\frac{1}{\underline{\lambda}}$ | $\frac{1}{\bar{\lambda}}$ |
| Гамма-процентные показатели | $\frac{1}{\underline{\lambda}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)$ | $\frac{1}{\bar{\lambda}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)$ |
| Вероятность безотказной работы за наработку t | $\exp(-\underline{\lambda}t)$ | $\exp(-\bar{\lambda}t)$ |
| Интенсивность отказов | $\underline{\lambda}$ | $\bar{\lambda}$ |

Таблица К.2 – Формулы для вычисления доверительных границ параметра экспоненциального распределения

| План испытаний | Формулы для вычисления доверительных границ уровня q | |
|---------------------|--|--|
| | нижней | верхней |
| [NUN] | $\frac{\hat{\lambda} \chi_{1-q}^2(2N)}{2(N-1)}; N > 1$ | $\frac{\hat{\lambda} \chi_q^2(2N)}{2(N-1)}; N > 1$ |
| [NUR], [NRr], [NRr] | $\frac{\hat{\lambda} \chi_{1-q}^2(2r)}{2(r-1)}; r > 1$ | $\frac{\hat{\lambda} \chi_q^2(2r)}{2(r-1)}; r > 1$ |
| [NUT] | $\frac{\hat{\lambda} N \chi_{1-q}^2(2r)}{d \left[2N - d + 1 + \frac{1}{2} \chi_{1-q}^2(2d) \right]}$, $d > 1$ | $\frac{\hat{\lambda} N \chi_q^2(2d+2)}{d \left[2N - d + \frac{1}{2} \chi_q^2(2d+2) \right]}$, для $d > 0$ |
| | | $\frac{r_0}{S}$, для $d = 0$ |

Окончание таблицы К.2

| План испытаний | Формулы для вычисления доверительных границ уровня q | |
|---|--|---|
| | нижней | верхней |
| [NMT], [NRT] | $\frac{\hat{\lambda} \chi_{1-q}^2(2d)}{2d}$ | $\frac{\hat{\lambda} \chi_q^2(2d)}{2d}, d > 10$ |
| <p>Примечания</p> <p>1 S – суммарная наработка изделий за время испытаний.</p> <p>2 Значения $\chi_q^2(m)$ и r_0 приведены в таблицах РД 50-690–89.</p> | | |

В случае распределения Вейбулла интервальные оценки показателей надежности вычисляются по формулам таблицы К.3 (для $N > 15$).

Таблица К.3 – Формулы для вычисления интервальных оценок показателей надежности для распределения Вейбулла

| Наименование показателя надежности | Формулы для вычисления доверительных границ уровня q | |
|---|---|---|
| | нижней | верхней |
| Средние показатели | $\hat{T}_{cp}(1 - \varepsilon_H)$ | $\hat{T}_{cp}(1 + \varepsilon_B)$ |
| Гамма-процентные показатели | $\hat{T}_{80}(1 - \varepsilon_H);$ $\hat{T}_{90}(1 - \varepsilon_H);$ $\hat{T}_\gamma - u_q \sqrt{D(\hat{T}_\gamma)}$ | $\hat{T}_{80}(1 + \varepsilon_B);$ $\hat{T}_{90}(1 + \varepsilon_B);$ $\hat{T}_\gamma + u_q \sqrt{D(\hat{T}_\gamma)}$ |
| Вероятность безотказной работы за наработку t | $\hat{P}(t) - u_q \sqrt{D[\hat{P}(t)]}$ | – |
| <p>Примечания</p> <p>1 $\varepsilon_H, \varepsilon_B$ – предельные относительные ошибки для оценки нижней и верхней доверительных границ соответствующего показателя надежности. Значения $\varepsilon_H, \varepsilon_B$ определяют по графикам, приведенным, в РД 50-690-89 для $q^* = 0,80; 0,90; 0,95$; u_q – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности q; $D(\hat{T}_j), D[\hat{P}(t)]$ – приближенные значения дисперсий для оценок показателей надежности. Формулы для вычисления $D(\hat{T}_j), D[\hat{P}(t)]$ даны в РД 50-690–89.</p> <p>2 Для $3 < N \leq 15$ интервальные оценки параметров показателей надежности в случае распределения Вейбулла при вычисляются по формулам, приведенным в РД 50-690–89.</p> | | |

В случае нормального распределения интервальные оценки показателей надежности вычисляются по формулам таблицы К.4 [30].

Таблица К.4 – Формулы для вычисления интервальных оценок показателей надежности для нормального распределения

| Наименование показателя надежности | Формулы для вычисления доверительных границ уровня q | |
|---|--|--|
| | нижней | верхней |
| Средние показатели | $\hat{\mu} - t_q(r-1) \frac{\hat{s}}{\sqrt{r}}$ | $\hat{\mu} + t_q(r-1) \frac{\hat{s}}{\sqrt{r}}$ |
| Гамма-процентные показатели | $\hat{T}_{\text{ср}} - K_1(\gamma, q, r) \hat{s}$ | $\hat{T}_{\text{ср}} + K_1(\gamma, q, r) \hat{s}$ |
| Вероятность безотказной работы за наработку t | $F_0(\underline{h})$, где $\underline{h} \approx \hat{h} - u_q \sqrt{\frac{1}{r} \left(1 + \frac{\hat{h}^2}{2} \right)}$; $\hat{h} = \frac{t - \hat{\mu}}{\hat{s}}$ | $F_0(\bar{h})$, где $\bar{h} \approx \hat{h} + u_q \sqrt{\frac{1}{r} \left(1 + \frac{\hat{h}^2}{2} \right)}$; $\hat{h} = \frac{t - \hat{\mu}}{\hat{s}}$ |
| <p>Примечания</p> <p>1 Значения $K_1(\gamma, q, r)$ и квантиль распределения Стьюдента $t_p(m) = t_q(r-1)$ приведены в таблицах РД 50-690–89.</p> <p>2 Если за время испытаний отказов не зафиксировано, то нижние доверительные границы средней наработки до отказа и гамма-процентной наработки до отказа вычисляются по формулам, приведенным в РД 50-690–89.</p> | | |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Базовский, И.** Надежность. Теория и практика / И. Базовский. – М. : Мир, 1965. – 376 с.
- 2 **Бугаев, В. П.** Совершенствование организации ремонта вагонов. Системный подход / В.П. Бугаев. – М. : Транспорт, 1982. – 152 с.
- 3 **Брауде, В. И.** Надежность подъемно-транспортных машин : учеб. пособие / В.И. Брауде, Л.Н. Семенов. – Л. : Машиностроение, 1986. – 183 с.
- 4 **Вагонное хозяйство** : учеб. для студентов вузов / П.А. Устич [и др.] ; под ред. П. А. Устича. – М. : Маршрут, 2003. – 560 с.
- 5 **Воинов, К. Н.** Надежность вагонов / К. Н. Воинов. – М. : Транспорт, 1982. – 110 с.
- 6 **Гнеденко, Б. В.** Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
- 7 ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1990–07–01 – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
- 8 ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Введ. 01.01.82 – М. : Издательство стандартов, 1990. – 116 с.
- 9 ГОСТ Р 27.002–2009. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. 2012–07–01 – М. : Стандартинформ, 2011. – 27 с.
- 10 ГОСТ 32192–2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 2014–07–01 – М. : Стандартинформ, 2014. – 27 с.
- 11 ГОСТ Р 54461–2011. Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Термины и определения. – Введ. 2012–07–01 – М. : Стандартинформ, 2012. – 15 с.
- 12 ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 20911–75; введ. 1991–01–01 – М. : Стандартинформ, 2009. – 9 с.
- 13 ГОСТ 18322–78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 18322–73; введ. 01.01.80 – М. : Стандартинформ, 2007. – 19 с.
- 14 ГОСТ 2.103–2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. – М. : Стандартинформ, 2015. – 6 с.
- 15 ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.01.82 – М. : Стандартинформ, 2009. – 274 с.
- 16 **Каневский, И.Н.** Неразрушающие методы контроля : учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
- 17 **Кельрих, М.Б.** Основи надійності вагонів : навч. посібник / М. Б. Кельрих [и др.]. – Харків : 2013. – 106 с.
- 18 Конструирование и расчет вагонов : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Лукин [и др.]; под ред. П.С. Анисимова. – М. : ФГОУ «УМК по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 688 с.
- 19 **Лаптева, И.И.** Неразрушающий контроль деталей вагонов : учеб. пособие / И.И. Лаптева, М.А. Колесников. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – 103 с.
- 20 Надежность и долговечность машин / Б. И. Костецкий [и др.]. – Киев : Техніка, 1975. – 408 с.
- 21 Надежность строительных машин / Г.П. Гриневиц [и др.] – М. : Стройиздат, 1983. – 296 с.
- 22 **Надежность** технических систем : справ. / Ю. К.Беляев [и др.]; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.
- 23 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

- 24 Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм. – М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983. – 260 с.
- 25 О безопасности машин и оборудования. Технический регламент Таможенного союза 010/2011 (ТР ТС 010/2011) : [Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 823].
- 26 Планирование работы вагонного хозяйства с использованием методов математического моделирования : учеб. пособие / В. И. Сенько [и др.] – Гомель : БелГУТ, 2012. – 276 с.
- 27 **Прейсман, В.И.** Основы надежности сельскохозяйственной техники / В. И. Прейсман. – Киев : Выща шк., 1988. – 247 с.
- 28 **Проников, А. С.** Надежность машин / А. С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
- 29 **Решетов, Д. Н.** Надежность машин : учеб. пособие для машиностроит. специальностей вузов / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев ; под ред. Д.Н. Решетова. – М. : Высш. шк., 1988. – 238 с.
- 30 Руководящий документ по стандартизации РД 50-690–89. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 102 с.
- 31 **Селиванов, А.И.** Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники / А.И. Селиванов, Ю.Н. Артемьев. – М. : Колос, 1978. – 248 с.
- 32 **Сосновский, Л. А.** Элементы теории вероятностей, математической статистики и теории надежности : учеб. пособие / Л.А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 1994. – 146 с.
- 33 **Устич, П. А.** Надежность рельсового нетягового подвижного состава : учеб. для студентов вузов ж.-д. трансп. / П.А. Устич, В.А. Карпычев, М.Н. Овечников ; под ред. П.А. Устича. – М. : Маршрут, 2004. – 416 с.
- 34 **Устич, П. А.** Надежность вагона : учеб. пособие / П.А. Устич. – М. : МИИТ, 1982. – 149 с.
- 35 **Хазов, Б. Ф.** Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
- 36 **Четвергов, В. А.** Надежность локомотивов : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В.А. Четвергов, А.Д. Пузанков ; под ред. В.А. Четвергова. – М. : Маршрут., 2003. – 415 с.

Учебное издание

ПИГУНОВ Владимир Владимирович

**Надежность подвижного состава
железнодорожного транспорта**

Учебное пособие

Редактор И. И. Э в е н т о в
Технический редактор В. Н. К у ч е р о в а
Корректор

Подписано в печать 2016 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. Уч.-изд. Тираж 200 экз.
Зак. № Изд. № 73.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
Распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.