

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности авиационной техники (АТ) - приоритетная задача авиационной промышленности и гражданской авиации. От ее успешного решения зависят безопасность полетов и эффективность эксплуатации летательных аппаратов (ЛА). Важное место в практической деятельности по обеспечению надежности занимает система стандартов «Надежность в технике» (ГОСТ Р 27.001-2009. «Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения»).

В последнее время разработаны и утверждены стандарты нового поколения этой системы, в том числе ГОСТ Р 27.002-2009. «Надежность в технике. Термины и определения», который внес значительные изменения в применяемую на практике терминологию по ГОСТ 27.002-89. Новая терминология в ряде случаев вошла в противоречие с отечественной теорией и практикой надежности.

Поэтому возникла необходимость в проведении анализа понятий, терминов и определений по надежности, установленных ГОСТ Р 27.002-2009, для определения возможности их применения при эксплуатации авиационной техники и обоснования замечаний и предложений по изменениям и дополнениям к стандарту [8, 9].

В изданных в 2011-2012 гг. пособиях по дисциплине «Надежность авиационной техники» [4, 5] частично была использована терминология по ГОСТ Р 27.001-2009.

При разработке нового стандарта в ряде случаев оказался утраченным многолетний положительный опыт применения терминологии, установленной ГОСТ 27.002.89. В связи с этим возникла необходимость в устранении указанных недостатков ГОСТ Р 27.002-2009 для обеспечения возможности его применения в гражданской авиации при эксплуатации АТ [8, 9].

Приказом Росстандарта № 1843-ст от 29.11.2012 приостановлено применение на территории Российской Федерации ГОСТ Р 27.002-2009 «Надёжность в технике. Термины и определения» и восстановлено применение межгосударственного стандарта ГОСТ 27.002-89 «Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения» в качестве национального стандарта РФ с 01.12.2012 года. Это решение Росстандарт принял на основании решения ТК 119, а также обращений Минобороны России, Института надёжности машин и технологий и ТК 259.

В настоящем учебном пособии используется терминология по ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» и материалы ранее изданных авторами учебных пособий и другие [2, 3] работы других авторов [1, 11-12].

В соответствии с рабочей программой в результате освоения дисциплины «Основы теории надежности» студент, обучающийся по направлению 162300, *должен:*

знать:

- количественные характеристики надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий;
- законы распределения, методы статистической оценки надежности изделий в эксплуатации;
- методику построения моделей и расчета надежности, способы повышения надежности изделий;
- свойства летательного аппарата (ЛА) как объекта технической эксплуатации;

уметь:

- выполнять расчет характеристик надежности, определять точность и достоверность статистических оценок надежности,
- оценивать основные эксплуатационно-технические свойства ЛА;
- обосновывать требования и мероприятия по совершенствованию программ технической эксплуатации и повышению эффективности использования ЛА;

владеть:

- методами оценки влияния на безопасность полетов последствий отказов авиационной техники, ошибок авиационного персонала, воздействий неблагоприятных условий;
- способами сбора и обработки информации по надежности изделий авиационной техники (АТ);
- методиками расчета и статистической оценки характеристик надежности.

1. ПРЕДМЕТ ОСНОВ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ, ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Предмет и задачи надежности

Надежность АТ является важнейшим элементом её качества. Без высокой надежности не может быть изделий высокого качества. С повышением требований к качеству изделий возрастает интерес к научным проблемам надежности. Роль проблемы обеспечения надежности современных ЛА возрастает по мере усложнения АТ, расширения областей ее применения, увеличения нагрузок и интенсивности использования, повышения уровня автоматизации.

В условиях широкой специализации и кооперирования производства надежность ЛА зависит от надежности продукции сотен предприятий различных отраслей промышленности, обеспечивающих поставки комплектующих изделий,

деталей и материалов.

Основной задачей теории надежности является разработка методов повышения и сохранения надежности изделий при проектировании, производстве и эксплуатации. При этом требуется заложить высокую надежность при проектировании изделий, обеспечить запроектированную надежность в процессе изготовления и поддерживать достигнутую надежность в процессе эксплуатации. От успешного решения проблемы повышения надежности ЛА зависит выполнение требований по повышению безопасности и регулярности полетов, интенсивности их использования, снижению трудовых и материальных затрат на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР).

Теория надежности - научная дисциплина, изучающая методы обеспечения эффективной работы технических объектов в процессе их эксплуатации, устанавливающая показатели надежности, обосновывающая требования к надежности и разрабатывающая методы обеспечения заданных требований при проектировании, производстве и эксплуатации объектов.

Теория надежности начала формироваться как самостоятельная научная дисциплина в 60-е годы прошлого века. Были сформированы ее основные задачи и понятия, развернуты работы по разработке методов расчета надежности элементов и систем.

Предмет теории надежности как научной дисциплины имеет различные аспекты.

В техническом аспекте теория надежности устанавливает закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности объектов; рассматривает влияние внешних и внутренних воздействий на процессы, происходящие в изделиях; создает методы расчета надежности и прогнозирования отказов; ищет способы повышения надежности при проектировании и изготовлении изделий, а также способы сохранения надежности при эксплуатации; определяет методику сбора, учета и анализа статистических данных, характеризующих надежность; разрабатывает методы проведения испытаний на надежность, обработки и оценки результатов испытаний.

В социально-экономическом аспекте учитывается, что все мероприятия по повышению надежности на всех этапах существования объекта должны обеспечивать максимальный народнохозяйственный эффект. Для достижения этого теория надежности устанавливает связь между количественными показателями надежности и экономической эффективностью, разрабатывает методы установления оптимальных значений показателей надежности и выбора оптимальных конструктивных технологических решений, режимов эксплуатации, ТОиР, обеспечивающих заданную надежность при минимальных затратах. При этом учитывается, что повышение надежности требует определенных затрат, а выпуск ненадежных изделий может привести к снижению безопасности и регулярности полетов, непроизводительным затратам временных, трудовых и

материальных ресурсов в процессе эксплуатации. Влияние надежности АТ на безопасность и регулярность полетов отражает социальные аспекты теории надежности.

В организационном аспекте должна быть обеспечена наилучшая организация трудовых процессов, обеспечивающих качественное (безошибочное) выполнение работ при проектировании, изготовлении и эксплуатации объектов. Решаются вопросы организации служб надежности, технического контроля, научно-исследовательских работ и обучения специалистов. Важность этого аспекта связана также с тем, что все задачи повышения и обеспечения надежности решаются эргономическими системами ("человек - машина - среда"), а значительная доля авиационных происшествий связана с влиянием человеческого фактора.

В правовом аспекте проводятся работы по стандартизации в области надежности, на основе создания комплекса общетехнических стандартов "Надежность в технике", обеспечивающего взаимопонимание специалистов, сопоставимость результатов расчетов и испытаний, внедрение современных концепций обеспечения надежности и регламентации норм надежности в стандартах и технических условиях на конкретные виды техники. В целевых программах в области транспорта особое значение придается задачам всемерного повышения технического уровня и качества продукции. Российское законодательство устанавливает требования обязательного соответствия качества поставляемой продукции государственным стандартам и техническим условиям. Качество продукции является определяющим критерием общественной оценки результатов деятельности каждого трудового коллектива и предприятия. На них государство возлагает ответственность за обеспечение надежности, безотказности и безопасности в эксплуатации выпускаемой техники.

Основные задачи (предметы исследования) теории надежности приведены на рис. 1.1.

1.2. Стандартизация в области надежности техники

Система стандартов «Надежность в технике» включает в себя ряд групп стандартов, однородных по проблематике (аспектам стандартизации) (табл. 1.1).

Наименование стандарта включает в себя групповой заголовок «Надежность в технике», заголовок, отражающий аспект стандартизации (например, «Система управления надежностью», «Состав и общие правила задания требований к надежности» и т.п.).

Примечание - После заголовка наименование стандарта может включать в себя подзаголовок, уточняющий содержание (например, «Основные положения»).

Обозначение стандарта содержит:

- индекс ГОСТ Р;

- код (регистрационный номер системы) 27;
- номер группы стандартов, соответствующий аспекту стандартизации;
- порядковый номер стандарта в группе;
- год принятия стандарта.

Например, ГОСТ Р 27.001-2009. «Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения».

Таблица 1.1

Содержание групп стандартов в соответствии с ГОСТ Р 27.001-2009.
«Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные
положения»

Номер группы стандартов	Содержание стандартов в группе
0	основные понятия, термины и определения, основные положения и общие требования к СУН, состав и общие правила задания требований к надежности, модели отказов и др.;
1	программы обеспечения надежности, повышения надежности, отработки на надежность;
2	системные аспекты, классификация отказов и предельных состояний, управление риском проекта, стоимость жизненного цикла, экспертиза проекта и др.;
3	техника анализа и прогнозирования надежности, анализ риска;
4	испытания на надежность, обработка статистических данных (проверка однородности, выявление и анализ зависимостей и др.), планы испытаний для контроля безотказности, готовности, ремонтпригодности, методы подтверждения ремонтпригодности, оценка надежности по экспериментальным данным, методы форсированных испытаний;
5	сбор, обработка и представление информации о надежности, сбор данных, справочные данные.

Новые национальные стандарты системы «Надежность в технике»:

ГОСТ Р 27.001-2009 «Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения» распространяется на изделия любых видов техники и устанавливает основные положения по управлению надежностью изделий при их разработке, производстве и поставке (в том числе при транспортировании, монтаже, установке, наладке), эксплуатации и утилизации, а также общий состав и структуру национальных стандартов системы «Надежность в технике».

ГОСТ Р 27.004-2009 «Надежность в технике. Модели отказов» распространяется на изделия любых видов техники, для которых предусматривают и решают задачи прогнозирования безотказности и обработки статистических данных об отказах на различных стадиях их жизненного цикла.

ГОСТ Р 27.302-2009. «Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей» распространяется на невосстанавливаемые изделия любых видов техники, для которых на стадии разработки проводят анализ и прогнозирование безотказности.

ГОСТ Р 27.403-2009 "Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы" распространяется на изделия любых видов техники, для которых в документации задают требования к показателю безотказности - вероятности безотказной работы (ВБР). Настоящий стандарт устанавливает планы испытаний для проверки соответствия ВБР заданным требованиям.

Стандарт *ГОСТ Р 27.404-2009 "Надежность в технике. Планы испытаний для контроля коэффициента готовности"* распространяется на восстанавливаемые (ремонтируемые) изделия, распределение наработок между отказами которых аппроксимируют экспоненциальным распределением, и устанавливает планы контрольных испытаний для проверки соответствия коэффициента готовности заданным требованиям.

Приказом Росстандарта № 1843-ст от 29.11.2012 приостановлено применение на территории Российской Федерации *ГОСТ Р 27.002-2009 «Надежность в технике. Термины и определения»* и восстановлено применение межгосударственного стандарта *ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения»* в качестве национального стандарта РФ с 01.12.2012 года.

1.3. Основные понятия, термины и определения

Система стандартов "Надежность в технике" устанавливает термины и определения основных понятий в области надежности, применяемых в документации, научно-технической, учебной и справочной литературе. Классификация терминов надежности позволяет сгруппировать их по наиболее существенным признакам (табл. 1.2).



Рис. 1.1. Основные задачи (предметы исследования) теории надежности

Таблица 1.2

Классификация основных терминов надежности

Объекты	Состояние	События	Свойства	Показатели	Резервирование
Изделие	Исправное	Повреждение	Надежность	Комплексные	Структурное
Система	Неисправное		Безотказность	Безотказности	Временное
Элемент	Работоспособное	Отказ	Долговечность	Долговечности	Информационное
Обслуживаемый	Неработоспособное		Ремонтпригодность	Ремонтпригодности	Функциональное
Необслуживаемый	Предельное		Сохраняемость	Сохраняемости	Нагрузочное
Восстанавливаемый					
Невосстанавливаемый					
Ремонтируемый					
Неремонтируемый					

Объект может именоваться системой, состоящей из составных частей (элементов), либо элементом, входящим в более сложную систему. Важным с методической точки зрения является разбиение изделий на обслуживаемые (необслуживаемые), восстанавливаемые (невосстанавливаемые), ремонтируемые (неремонтируемые). *Обслуживаемым (необслуживаемым) объектом* называется объект, для которого проведение технического обслуживания предусмотрено (не предусмотрено) в нормативно - технической, конструкторской документации.

Восстанавливаемым (невосстанавливаемым) является объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено (не предусмотрено) в нормативно-технической, конструкторской документации.

Ремонтируемым (неремонтируемым) называется объект, для которого проведение ремонтов предусмотрено (не предусмотрено) в нормативно-технической, конструкторской документации.

Рассматриваемые в теории надежности состояния охватывают все технические состояния объекта, характеризующие совокупностью значений параметров и качественных признаков, номенклатура и пределы допустимых

значений которых устанавливаются в нормативно-технической и конструкторской документации.

Исправным состоянием называется состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации.

При *неисправном состоянии* объект не соответствует хотя бы одному из этих требований.

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

При *неработоспособном состоянии* значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. При этом различие между исправным и работоспособным состоянием заключается в том, что для исправного состояния выполняются все требования, относящиеся как к основным, так и второстепенным параметрам, а для работоспособного состояния - только требования к основным параметрам. То есть объект может быть неисправным, но работоспособным.

Предельным состоянием является состояние объекта, при котором его дальнейшее применение недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Переход объекта из исправного и работоспособного состояния в неисправное и неработоспособное состояния соответственно происходит вследствие повреждения и отказа.

Повреждение является событием, заключающимся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния.

Критерием отказа (предельного состояния) являются признаки или совокупность признаков неработоспособного (предельного) состояния объекта, установленные нормативно-технической и конструкторской документацией. Схема основных состояний и событий приведена на рис. 1.2.

Надежность - свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнить требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, ТОиР, хранения и транспортирования. Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетаний свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

Например, для некоторых неремонтируемых объектов основным свойством

является *безотказность*, представляющая собой свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. При этом под *наработкой* понимается продолжительность или объем работы объекта.

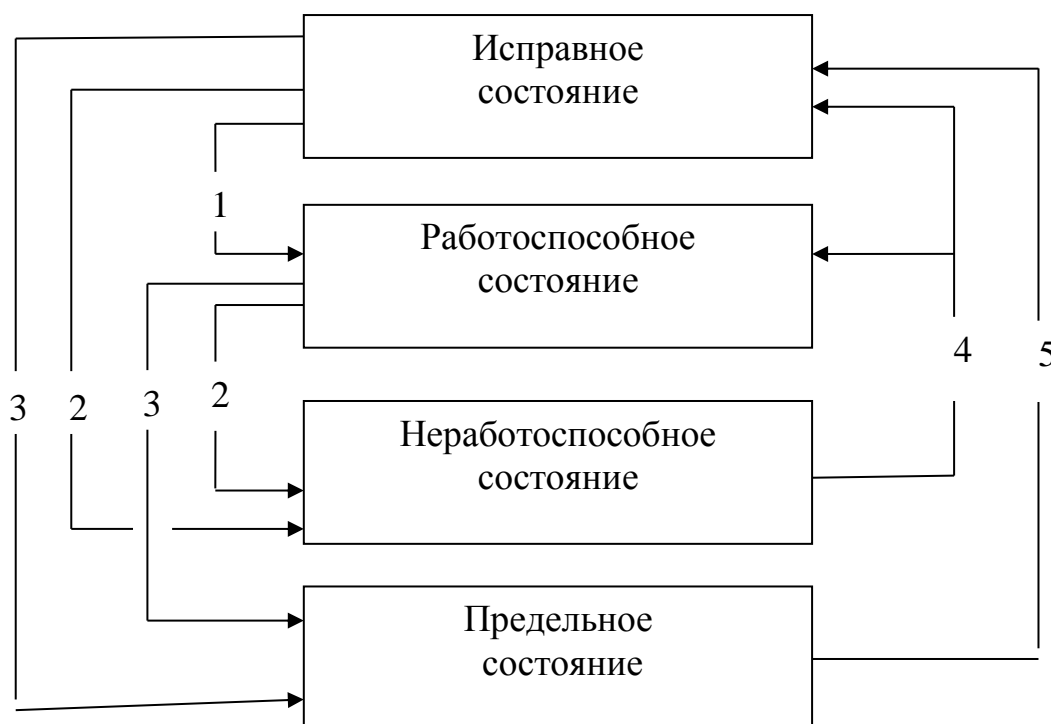


Рис. 1.2. Схема основных состояний и событий:

1 - повреждение; 2 - отказ; 3 - переход объекта в предельное состояние;
4 - восстановление; 5 – ремонт

Долговечность - это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе ТОиР. Различие между безотказностью и долговечностью заключается в следующем. Безотказность - это свойство непрерывно сохранять работоспособность, а долговечность - это свойство длительно сохранять работоспособность с возможными перерывами для ТОиР.

Для ремонтируемых объектов одним из важнейших свойств может быть *ремонтпригодность* - свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения ТОиР.

Сохраняемостью является свойство объекта сохранять значение показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования.

Количественно надежность объекта характеризуется *показателями надежности*. Показатели, относящиеся к одному из свойств, составляющих

надежность объекта, называются единичными. К единичным показателям относятся показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

Комплексным показателем надежности является показатель, относящийся к нескольким свойствам, составляющим надежность.

Одним из основных средств обеспечения заданного уровня надежности объектов является *резервирование*, представляющее собой применение дополнительных средств и возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов. Совокупность дополнительных средств и возможностей, используемых при резервировании, образует резерв. В зависимости от содержания резерва различаются виды резервирования. *Структурное резервирование* основано на применении резервных элементов структуры объекта, *временное резервирование* - на применении резервов времени, *функциональное резервирование* - функциональных резервов, *информационное резервирование* - резервов информации; *нагрузочное резервирование* - нагрузочных резервов.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Классификация отказов и механизмы их возникновения

Классификация отказов по основным признакам приведена в табл. 2.1.

Значимость отказов объектов определяется их последствиями. К критическим можно отнести отказы, заключающиеся в невыполнении целевых функций функциональной системы ЛА. Последствиями *критических (функциональных) отказов* могут быть особые ситуации полета, к которым в соответствии с нормами летной годности ЛА относятся: усложнение условий полета, сложная, аварийная и катастрофическая ситуации.

Таблица 2.1

Классификация отказов

Признак классификации	Вид отказа
По значимости	Критический Существенный Несущественный
Зависимость отказов	Зависимый Независимый
Характер возникновения	Внезапный Постепенный
Характер обнаруживаемости	Явный Скрытый
Причина возникновения	Конструктивный Производственный Эксплуатационный

К *существенным отказам* могут быть отнесены отказы, приводящие к задержкам рейсов, к сверхплановым простоям ЛА и к экономическим потерям. *Несущественными отказами* являются отказы, устраняемые при плановом техническом обслуживании и не приводящие к негативным последствиям.

Зависимым (независимым) отказом является отказ объекта, обусловленный (не обусловленный) отказом другого объекта.

Внезапным отказом является отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта.

Постепенный отказ представляет собой отказ, характеризующийся постепенным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта.

Явный отказ обнаруживается летным или инженерно-техническим персоналом при функционировании объекта по признакам, оказывающим непосредственное или косвенное воздействие на органы чувств человека.

Скрытый отказ самостоятельно не проявляется в процессе функционирования и требует для обнаружения применения методов и средств диагностирования.

Конструктивные отказы возникают в результате несовершенства или нарушения установленных правил и норм конструирования объекта.

Производственные отказы возникают из-за несовершенства или нарушения установленных технологических процессов изготовления объекта (дефектов технологии).

Эксплуатационные отказы возникают в результате нарушения установленных правил или условий эксплуатации объекта.

При рассмотрении характера возникновения отказов могут быть определены следующие механизмы:

механизм мгновенных повреждений, приводящий к возникновению внезапных отказов;

механизм накапливающихся повреждений, приводящий к возникновению постепенных отказов.

Для механизма мгновенных повреждений характерно наличие отдельных пиков нагрузки. Если предположить, что отказ элемента возникает в случае, когда нагрузка $S(t)$ превышает некоторый предельный уровень S_n , то в силу случайности изменения нагрузки момент отказа t также будет случайным (рис. 2.1). Характерно, что отказ элемента наступает независимо от наработки и технического состояния объекта. Пик нагрузки возникает, например, при нерасчетном порыве ветра или грубой посадке ЛА. Возможности прогнозирования внезапных отказов ограничены.

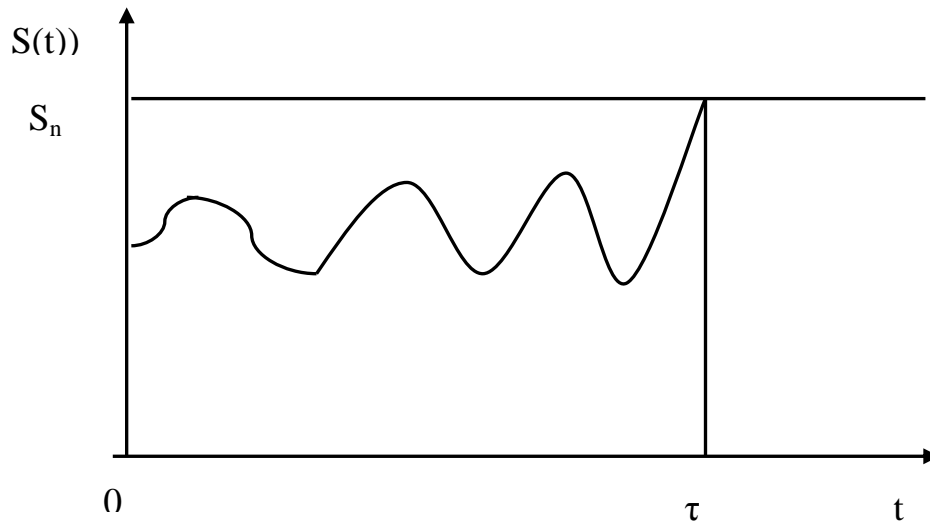


Рис. 2.1. Схема мгновенных повреждений

Для механизма накапливающихся повреждений характерно постепенное накопление изменений параметров, определяющих работоспособность объекта, вследствие старения, изнашивания, коррозии, усталости. Выход указанных параметров за допустимые пределы (достижение предельного значения параметра S_n) означает появление постепенного отказа (рис. 2.2).

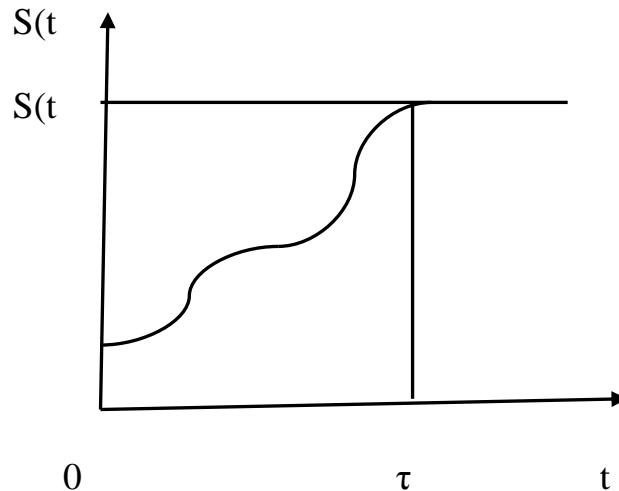


Рис. 2.2. Схема накапливающихся повреждений

Случайность моментов возникновения постепенных отказов связана с разбросом значений параметров, характеризующих начальное качество объектов и флуктуации условий эксплуатации.

Возможна и такая ситуация, при которой возникновение отказа происходит вследствие совместного воздействия обоих механизмов: накопления повреждений и мгновенных повреждений. Сначала происходит ослабление

конструкции (износ, усталостные трещины, коррозия) из-за накопления повреждений, а затем воздействие нагрузки, превышающей расчетную. При этом отказ может наступить при меньшей нагрузке, чем для нового объекта (рис. 2.3).

2.2 Классификация причин отказов

Причины отказов характеризуются явлениями, процессами, событиями и состояниями, приведшими к возникновению отказов объекта. Исследование причин требует привлечения физической теории надежности и ряда инженерных дисциплин, таких как сопротивление материалов, авиационное материаловедение, конструкция и прочность ЛА и авиадвигателей. К явлениям, вызывающим отказы объектов, могут быть отнесены: пластическая деформация, разупрочнение поверхности, радиационное облучение и т.п. Отдельные явления приводят к появлению процессов и событий. К процессам могут быть отнесены: изнашивание, рост трещины, коррозия, старение материалов и т.п. Событиями, приводящими к отказам, могут являться: появление перегрузок, попадание абразива в масло, схватывание сопрягаемых поверхностей, изменение напряжений в сети, нарушение усталостных режимов и правил эксплуатации и т.п. Состояниями изделий, являющимися причиной отказов, могут быть: отсутствие защиты от попадания пыли и влаги, наличие остаточных напряжений или концентраторов напряжений, микро- и макротрещины, дефекты сборки, наличие рисок и т.п.

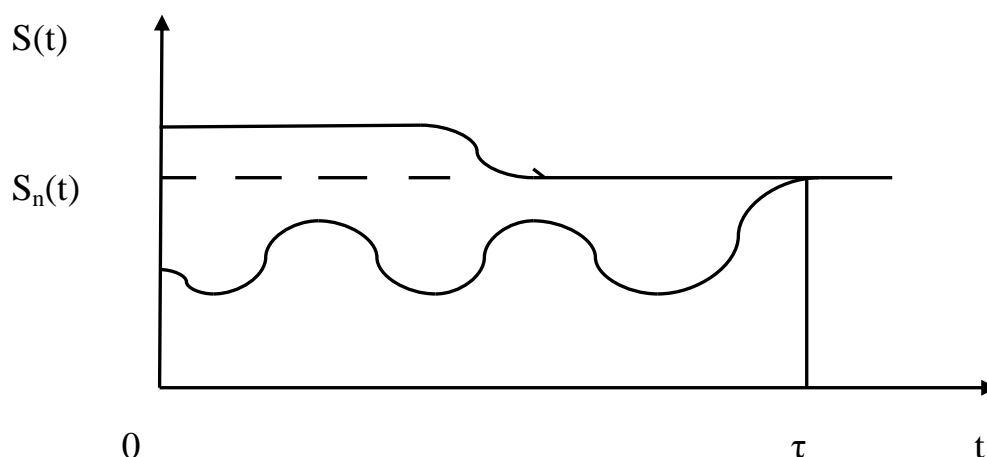


Рис. 2.3. Совместное воздействие механизмов накопления повреждений ($S_n t$) и мгновенного повреждения (нагрузки $S(t)$)

При установлении причин отказов необходимо определить явления, процесса, события и состояния, приводящие к их появлению, а также возможное сочетание этих факторов.

К причинам возникновения конструктивных отказов относятся: незащищенность узлов трения, наличие концентраторов напряжений, ошибки в учете распределения напряжений, неправильный выбор материалов и смазок и

т.п.

К причинам возникновения производственных отказов (дефекты технологии) относятся:

- дефекты состава материала (включения, охрупчивающие примеси); дефекты плавки и изготовления заготовок (пористость, усадочные раковины, неметаллические включения, расслоения);
- дефекты механической обработки (ожоги, задиры, заусеницы, трещины, прорезы, избыточная локальная пластическая деформация);
- дефекты сварки (трещины, остаточные напряжения, углубления, недостаточная глубина шва, термическое повреждение отдельных участков основного материала);
- дефекты термообработки (перегрев, закалочные трещины, обезуглероживание, избыточные остаточные аустениты);
- дефекты обработки поверхности (химическая диффузия, водородное охрупчивание, снижение механических свойств материала);
- дефекты сборки (повреждения поверхности, задиры, внесение абразива, несоответствие размеров деталей, перекосы сочленяемых деталей).

К причинам возникновения эксплуатационных отказов относятся: нарушение регламента и технологии технического обслуживания, появление перегрузок, использование нерасчетных режимов работы, использование не по назначению.

Отказы, возникающие из-за несовершенства или нарушения технологии ремонта, являются ремонтными отказами. Они могут быть отнесены к производственным, эксплуатационным или рассматриваться отдельно, в зависимости от места выполнения ремонтных работ (на заводах изготовителей, ремонтных заводах или в эксплуатационных предприятиях). По своему характеру ремонтные отказы близки к производственным, и их возникновение связано с ремонтными дефектами.

При исследовании причин отказов проводится анализ режимов и условий эксплуатации, действующих нагрузок. Воздействующие на объекты нагрузки подразделяются на две группы:

- нагрузки, вызванные внешними факторами;
- нагрузки, связанные с функционированием самого объекта (внутренние факторы).

К внешним факторам относятся следующие воздействия (табл. 2.2):

- механические (колебания, удар, ускорение, механическое давление, сила, поток жидкости);
- климатические (атмосферное давление, температура среды, влажность воздуха или других газов, атмосферные осадки, шумы, пыль);
- биологические (растения, животные);
- радиационные (альфа, бета и гамма-излучения, рентгеновское излучение, нейтронное и протонное излучение);
- электромагнитные (электрический ток,

электрическое поле);

Таблица 2.2

Виды внешних факторов

№ п/п	Виды факторов	Факторы
1	2	3
1	Механические	Колебания, удар, ускорение, механическое давление, сила, поток жидкости
2	Климатические	Атмосферное давление Температура среды Влажность воздуха Атмосферные осадки Туман, пыль, песок Солнечное излучение Поток воздуха Среда с коррозионно-активными агентами Ледово-грунтовая вода
3	Биологические	Растения Беспозвоночные животные Позвоночные животные
4	Радиационные	Альфа и бета излучения Гамма-излучение Нейтронное излучение Электронное излучение Протоновое излучение Рентгеновское излучение Излучение многозарядных частиц
5	Электромагнитные	Электрический ток Электрическое поле
6	Термические	Тепловой удар Аэродинамический нагрев Нагрев трением Нагрев потоком Пламя
7	Специальные среды	Кислотно-щелочная среда Масла и смазки Топливо Рабочие тела

- специальные среды (кислотно-щелочная и нейтральная среды, масла и смазки, топлива, рабочие тела);

- термические (тепловой удар, аэродинамический нагрев, нагрев тепловым

потоком, нагрев трением, пламя).

К внутренним факторам относятся: нагрев отдельных элементов или частей поверхности, деформации, неравномерность износа и другие.

Укрупненно виды нагрузок подразделяются на механические, электрические, акустические, топливные, гидравлические (пневматические), радиационные, электромагнитные, магнитные, биологические, климатические и химические. Действие различных видов нагрузок взаимосвязано. Так сравнительно большая тепловая инерция материалов механических систем приводит к неравномерному распределению температуры по отдельным участкам деталей, что является причиной неравномерной деформации и, как следствие этого, появления механических нагрузок.

При анализе причин отказов необходимо учитывать вид воздействующих нагрузок, длительности воздействия и закономерности изменения нагрузок во времени. Процесс воздействия нагрузок на изделие называется *нагрузением*. В результате действия, нагружения детали и узлы находятся в состоянии нагруженности. Нагруженность деталей и узлов представляет собой состояние деталей и узлов, возникшее под влиянием внешних и внутренних нагрузок, зависящих от особенностей конструкции и условий функционирования изделия.

Под воздействием внешних и внутренних факторов возникают различные виды повреждений и отказов объектов (табл. 2.3 – 2.6).

Схема возникновения отказов с учетом воздействующих на него внешних и внутренних факторов приведена на рис. 2.4. Руководящими документами системы стандартов "Надежность в технике" рекомендуется при анализе причин отказов установление следующих признаков: факта отказа, внешних проявлений отказа, вида отказа, технической сущности отказа, причин отказа. Порядок проведения анализа отказов и повреждений объектов приведен в табл. 2.7.

Факт отказа определяется на основе критериев отказа, установленных в нормативно-технической документации. Например, критерием отказа, характеризующим нарушение работоспособного состояния, может быть выход одного из заданных параметров объекта за пределы установленного допуска.

Внешнее проявление отказа устанавливается органолептическими методами без использования диагностических средств. К ним относятся, например, шум в коробке передач, течь масла, появление дыма.

Вид отказа устанавливается в результате проведения диагностических процедур. К видам отказов относятся, например, износ зубьев шестерен, разрушение подшипника, ослабление пружины фиксатора, деформация вала.

Техническая сущность - физико-технические факторы, приводящие к отказу. Например, технической сущностью такого вида отказа, как износ зубьев шестерен, могут являться перекос шестерен, отсутствие приработки, попадание постороннего предмета в зацепление; для предельного износа шлицевых соединений - масляное голодание, непараллельность осей шлицевых валов, несоосность посадочных мест подшипников.

Причина отказа - это явления, процессы, события и состояния, вызывающие возникновение отказа. Например, причинами отказа, связанного с износом шлицевого соединения, могут явиться: нарушение правил затяжки болтов крепления крышек и корпусов коробки приводов, срез резьбы болта крепления крышек или корпусов при ремонте, нарушение технологии изготовления прокладки, низкое качество резины уплотнения, нарушение правил заправки маслом.

2.3. Физико-химические процессы, приводящие к отказам

Физико-химические процессы, приводящие к отказам, могут быть классифицированы на группы в зависимости от вида материала, места применения процесса, вида энергии, определяющего характер процесса, вида эксплуатационного воздействия, характера (внутреннего механизма) процесса (табл. 2.8).

Таблица 2.3

Виды повреждений и отказов АТ

Повреждения и отказы		
Конструктивные	Производственные	Эксплуатационные
Недостатки конструкционных работ	Дефекты материала	Старение материала
Недостатки расчетов на прочность	Дефекты при плавке и изготовлении заготовок	Нарушение прочности
Неправильный выбор материалов	Дефекты механической обработки	Изнашивание
Функциональные недостатки	Дефекты сварки	Коррозия
	Дефекты термообработки	Нарушение режимов эксплуатации
	Дефекты обработки поверхности	
	Дефекты сборки	

Материалы большинства изделий АТ представляют собой кристаллические твердые тела. По виду связи между атомами (или ионами) кристаллической структуры различают три основных класса твердых кристаллических тел: металлы, ионные кристаллы (большинство диэлектриков), ковалентные кристаллы (полупроводники). Кроме твердых тел, в технике широко используются органические и неорганические полимеры, разделяющиеся на: аморфные, в которых полимерные цепи ориентированы друг относительно друга случайным образом; кристаллические, которые состоят из кристаллитов, т.е. участков с упорядоченным расположением цепей макромолекул; эластомеры, занимающие промежуточное положение между аморфными и кристаллическими полимерами (под действием механического напряжения и удлинения материала цепи в

аморфных областях выпрямляются и располагаются почти параллельно, создавая кристаллическое состояние, при снятии напряжения - восстанавливается практически аморфная структура).

Таблица 2.4

Конструктивные недостатки (дефекты), приводящие к повреждениям и отказам АТ

Конструктивные повреждения и отказы			
Недостатки конструкционных работ	Недостатки расчетов на прочность	Неправильный выбор материалов	Функциональные недостатки
<p>Недостаточная кратность резервирования ответственных элементов</p> <p>Наличие концентраторов напряжений</p> <p>Недостатки в выборе силовой схемы</p> <p>Не обеспечено снижение напряжения во вращающихся деталях</p> <p>Не обеспечены минимальные температуры и перепады температур на деталях</p> <p>Незащищенность узлов трения</p>	<p>Ошибка в выборе расчетных режимов и нагрузок</p> <p>Ошибка в выборе расчетной схемы</p> <p>Неправильный выбор критериев оценки прочности и допустимости запасов</p> <p>Недостатки методик расчета</p> <p>Ошибки в оценке температурного состояния деталей</p>	<p>Недостаточные кратковременные механические свойства</p> <p>Недостаточная выносливость</p> <p>Недостаточная длительная прочность, ползучесть, релаксация</p> <p>Недостаточная термостойкость</p> <p>Недостаточная коррозионная и эрозионная стойкость</p> <p>Неправильный подбор материалов деталей в сочленениях</p> <p>Неправильный подбор смазок в подвижных соединениях</p>	<p>Недостаточная устойчивость газодинамических процессов и процессов горения</p> <p>Нестабильность, неустойчивость системы регулирования</p> <p>Нестабильность запуска ГТД</p> <p>Негерметичность систем подвода воздуха, газа, топлива, масла, гидрожидкости</p> <p>Повышенная неравномерность температур, давлений, скоростей</p> <p>Невзаимозаменяемость узлов, деталей, агрегатов</p>

Производственные дефекты, приводящие к повреждениям и отказам АТ

Производственные дефекты						
Дефекты материала	Дефекты плавки и заготовок	Дефекты механической обработки	Дефекты сварки	Дефекты термообработки	Дефекты обработки по поверхности	Дефекты сборки
Включения Охрупчивающие примеси	Пористость Усадочные раковины Неметаллические включения Расслоения	Ожоги Задиры Заусенцы Трещины Прорезы Избыточная локальная пластическая деформация	Трещины Остаточные напряжения Углубления Недостаточная глубина шва Термическое повреждение основного материала	Перегрев Закалочные трещины Обезуглероживание Избыточные остаточные аустениты	Химическая диффузия Водородное охрупчивание Снижение механических свойств материала	Повреждение поверхности Задиры Внесение абразивов Несоответствие размеров Перекосы

Эксплуатационные повреждения объектов

Эксплуатационные повреждения				
Старение материалов		Нарушение прочности	Изнашивание	Коррозия
Металлов и сплавов	Полимерных материалов			
<p>Аллотропические превращения Мартенситные превращения Растворение в твердом состоянии и распад перенасыщенных твердых растворов Упорядочение и разупорядочение твердых растворов Образование твердых растворов из эвтектоидной смеси</p>	<p>Деструкция: термическая; фотохимическая; -окислительная Структурирование</p>	<p>Динамическое Усталостное Статическое Ползучесть</p>	<p>Механическое: при упругом контакте; -при пластическом деформировании; при микрорезании Абразивное Газообразное Усталостное Кавитационное Молекулярно-механическое Коррозионно-механическое Окислительное При фретинг-коррозии</p>	<p>По характеру взаимодействия металла со средой: химическая; электрохимическая По типу коррозионной среды: газовая; атмосферная; внешним током; блуждающим током; контактная; при трении; фретинг-коррозия По геометрическим характеристикам разрушения: сплошная; равномерная; местная По видам распространения: послойная; нитевидная; структурная; межкристаллитная</p>

Порядок проведения анализа отказов и повреждений объектов

№№ п/п	Признаки отказа	Определение понятия	Примеры
1	2	3	4
1	Критерий отказа	Заранее оговоренные признаки нарушения работоспособности, по которым принимают решение о факте наступления отказа	Предельное значение параметра. Качественный признак (наличие предельного состояния)
2	Факт отказа	Наличие отказа, определяемое по критерию отказа	Предельная длина трещины, глубина забоины на лопатке компрессора, предельный люфт в шарнирном соединении шасси
3	Внешнее проявление отказа	Непосредственное или косвенное воздействие на органы чувств оператора признаков перехода в неработоспособное состояние	По стабильности: стабильная неисправность, нестабильная неисправность, перемежающаяся неисправность. По проявлению: неявная неисправность, скрытая неисправность, систематическая неисправность
4	Вид отказа	Совокупность возможных или наблюдаемых отказов элемента и/или системы, объединенных в некоторую классификационную группу по общности одного или нескольких признаков (причины, механизм возникновения, внешние проявления и другие признаки, кроме последствий отказа)	По значимости отказа: критический отказ, полный отказ, частичный отказ. По зависимости отказа: зависимый отказ, независимый отказ

1	2	3	4
5	Механизм отказа	Физический или химический процесс, который приводит к отказу	Отказ вследствие изнашивания, отказ вследствие старения, систематический отказ, отказы общего вида, отказы по общей причине
6	Причина отказа	Обстоятельства в ходе разработки, производства или использования, которые привели к отказу	Конструкционная неисправность, производственная неисправность, эксплуатационная неисправность. Систематическая неисправность, ошибка человека
7	Способ устранения отказа	Действия по обнаружению и устранению отказа	Обнаружение неисправности, локализация неисправности, диагностирование неисправности, устранение неисправности, проверка функционирования, восстановление, отсроченное техническое обслуживание, плановое техническое обслуживание, неплановое техническое обслуживание
8	Последствия отказа	Важность, значимость отказов в пределах или вне пределов изделия	Критический отказ, полный отказ, частичный отказ

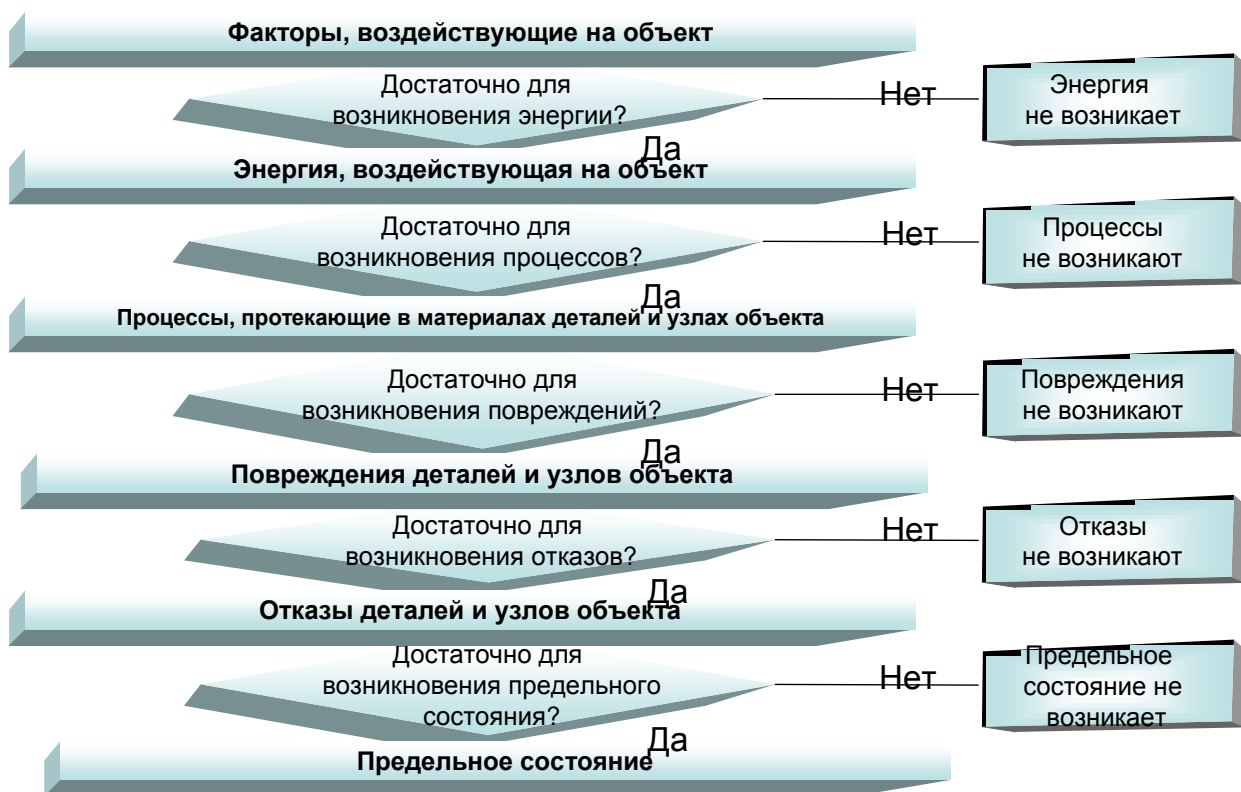


Рис. 2.4. Схема возникновения отказов

Во всех используемых в технике деталях из кристаллических твердых материалов имеются элементарные дефекты кристаллической структуры, которые при определенных условиях эксплуатации могут явиться причиной отказов. Образование дефектов и их перемещение в твердом теле под воздействием тепла и различных внешних факторов может привести к деформации элементов и их разрушению.

Наиболее типичными являются следующие виды дефектов: точечные дефекты (вакансии, межузельные атомы и др.); одномерные (линейные) дефекты (дислокации); двумерные поверхностные дефекты (границы зерен и двойников, дефекты упаковки и др.); трехмерные (объемные) дефекты (пустоты, включения и др.).

Для изделий машиностроения наиболее распространенным типом точечного дефекта являются вакансии (в узлах кристаллической решетки отсутствует атом или ион), которые оказывают решающее влияние на процессы ползучести, обезуглероживания, графитизации и другие процессы, связанные с переносом атомов в молекулах.

Классификация процессов, приводящих к отказам объектов

№№ п/п	Признак классификации	Вид процесса, приводящего к отказу
1	2	3
1	По типу (классу) материала	в металлах в ионных кристаллах в ковалентных кристаллах
2	По месту протекания	в объеме материала элемента на поверхности элемента в сочленениях деталей в электрических цепях, связанных с взаимным влиянием элементов
3	По типу энергии	механический тепловой электрический химический электромагнитный
4.	По типу эксплуатационного воздействия:	
4.1	По условиям возникновения воздействующего фактора	окружающая среда условия активной работы
4.2	По характеру влияния на материал окружающей или рабочей среды	абсорбционный диффузионный химический коррозионный радиационный кавитационный эрозионный
4.3	По виду изменений, вызываемых в материале	необратимые обратимые
4.4	По характеру изменений по времени	возмущения, постоянные или знакопеременные изменения воздействия, являющиеся случайными функциями времени (стационарные, нестационарные);

1	2	3
5	По виду физико-химических процессов	диффузионные процессы в объеме и на поверхности твердых тел; перемещение и скопление точечных дефектов и дислокаций в кристаллических твердых телах; флуктуационный разрыв межатомных связей в металлах и сплавах; разрыв химических связей цепей макромолекул полимерных материалов; сорбционные процессы; электролитические процессы; действия поверхностно – активных веществ; сублимация материала; структурные превращения

Дислокациями называются одномерные (линейные) дефекты и искажения структуры кристаллической решетки. Срыв и перемещение дислокаций происходит при пластической деформации под действием внешних сил или термической активизации. Теория дислокаций позволяет качественно описать процессы деформации, разрушения и упрочнения твердых тел. Упрочнение металла методами пластической деформации связано с образованием препятствий для дальнейшего движения дислокации при их пересечении.

Под диффузией понимается процесс необратимого переноса атомов вещества в объеме твердых тел и на их поверхности.

С процессом диффузии связаны структурные изменения в материалах, процессы ухудшения их физических и механических свойств. Диффузия в значительной степени определяет кинетику физико-химических процессов, приводящих к возникновению отказов: разрушение материалов, ползучесть, старение, коррозия.

Современная теория физики твердого тела рассматривает процесс разрушения материалов как постепенный кинетический термоактивационный процесс, развивающийся в механически напряженном материале с момента приложения нагрузки любой величины. Скорость процессов механического разрушения деталей зависит от структуры и свойств материала, геометрической формы и состояния поверхности, от напряжения, вызываемого нагрузкой и температурой. У металлов разрушения определяются в основном двумя процессами: разрывом межатомных связей за счет тепловых функций и направленной диффузией вакансий к трещинам. Разрушение нагруженных полимерных материалов вызывается процессом разрыва внутримолекулярных химических связей в результате тепловых флуктуаций, активизированных механическими напряжениями.

Старение материалов представляет собой процесс изменения их физико-

механических свойств во времени в условиях длительного хранения или эксплуатации. Обычно старение вызывается недостаточно стабильным (неравновесным) состоянием материала и постепенным его переходом в стабильное (равновесное) состояние. Старение материала может приводить как к улучшению, так и ухудшению отдельных свойств материалов. К старению металлов и сплавов следует отнести все процессы изменения во времени их свойств, связанные с превращением металлов и сплавов в твердом состоянии. К основным видам превращений в твердом состоянии относятся аллотропическое превращение, мартенситное превращение и распад мартенситной структуры, растворение в твердом состоянии и распад перенасыщенных твердых растворов, упорядочение и разупорядочение твердых растворов, образование твердого раствора из эвтектоидной смеси. Эти процессы можно разделить на две группы: превращения, связанные с изменением кристаллической структуры, протекающие без изменения химического состава образующихся при превращении фаз; превращения, сопровождающиеся образованием фаз с изменением химического состава.

Наибольшее практическое значение имеют процессы старения, связанные с распадом перенасыщенных твердых растворов (процессы выделения) и распадом мартенситной структуры. Эти процессы обусловлены неустойчивой (метастабильной) структурой сплава, получаемой в результате технологической обработки, например, закалки, наклепа, и связаны с появлением искажений кристаллической решетки. Такое метастабильное состояние характеризуется повышенным по сравнению со стабильным состоянием уровнем внутренней (стабильной) энергии. Отсюда сущность процесса старения - самопроизвольный переход от нестабильного состояния в более стабильное с более низким уровнем внутренней энергии, связанной с атомными перемещениями в решетке металла. Температура и деформации способствуют этим перемещениям.

Старение полимерных материалов обусловлено, в основном, процессами, приводящими к деструкции полимеров, т.е. распаду основных цепей макромолекул на осколки более простого строения, изменению строения макромолекул и взаимодействия *между* ними без разрыва основных цепей (структурированию). Деструкция и структурирование оказывают противоположное влияние на свойства полимеров. С ростом поперечных связей при структурировании уменьшается растворимость полимеров, теряются механические свойства, характерные для линейных полимеров: эластичность, вязкость и др.

Наибольшее значение имеют процессы деструкции. Они происходят под влиянием физических (тепло, свет, ионизация и т.д.) или химических (кислород, вода и т.д.) факторов. Более распространенными являются термическая, фотохимическая и окислительная деструкции; термоокислительная и фотохимическая активизированная окислительная деструкции. Физические изменения в полимерах связаны с перемещением макромолекул или их сегментов, а химические - с разрывом химических связей, уменьшением размеров макромолекул, что сопровождается изменениями их химического состава. При

старении полимеров изменяются структура, молекулярный вес, химический состав, взаимодействие макромолекул, определяющие физико-механические свойства этих материалов: прочность, твердость, пластичность, эластичность, растворимость.

Прочность представляет собой свойство материала (в определенных условиях, пределах) сопротивляться разрушению, а также изменению формы под действием внешних или внутренних нагрузок. Параметрами прочности являются пределы прочности, пропорциональности, текучести, ползучести, выносливости и др.

Деформация - это изменение формы, размеров изделия или его части под действием внешних сил, при нагревании, охлаждении, изменении влажности и т.п. Различают два вида деформации: упругую, исчезающую после устранения воздействий, вызывающих деформацию, и пластическую, остающуюся после удаления нагрузки. Под влиянием деформации может происходить растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, изменение вида объекта. Основными параметрами деформационных характеристик являются относительное остаточное удлинение, величина уменьшения площади поперечного сечения.

Отказами по параметрам прочности могут быть события, связанные с разрушением изделия или с получением недопустимой величины деформаций. Чаще всего отказы по параметрам прочности связаны с изломом элементов конструкций или их деформацией. Изломы подразделяются на две большие группы: хрупкие и вязкие. Под хрупкими изломами понимают изломы без признаков макроскопических пластических деформаций. Такой вид излома возникает при разрушении в условно упругой зоне деформации. Однако при этом следует иметь в виду, что у вершины распространяющейся хрупкой трещины в металлах возникает локальная пластическая деформация. Хрупкое разрушение распространяется с большой скоростью, сопоставимой со скоростью распространения звука в данном материале. Разрушение происходит вдоль определенных кристаллографических плоскостей зерна (плоскости скола), вызывая транскристаллитное разрушение, или по границам зерен, вызывая межкристаллитное разрушение. Хрупкое разрушение происходит в тех случаях, когда появляются факторы, препятствующие пластическим деформациям. Это может иметь место при изменении под воздействием эксплуатационных нагрузок свойств материала (выделение хрупких карбидов, накопление усталостных повреждений, охрупчивание границ зерен и т.п.) или из-за приближения напряженного состояния к переносному. Хрупкое разрушение происходит, как правило, мгновенно, без видимых изменений состояния объекта.

Расчеты на надежность по критериям хрупкого разрушения производятся на основе линейной упругой механики разрушения или на разрабатываемых в настоящее время методах нелинейной механики разрушения, учитывающих явление пластических деформаций в вершинах трещин.

Пластическому или вязкому излому предшествует макроскопическая деформация, вызванная сдвигом в плоскостях скольжения или плоскостях скола по границам зерен. Волокнистый излом относят к вязкому разрушению. Он

характерен тем, что плоскость излома перпендикулярна к направлению максимальных растягивающих напряжений. Этот излом образуется в условиях плоского деформированного состояния.

В зависимости от приложенных нагрузок изломы подразделяются на динамические, усталостные, изломы от превышения предела прочности, изломы при изгибающих и скручивающих нагрузках. К динамическим относятся изломы, происходящие внезапно под действием перегрузок или удара. Среди динамических изломов следует различать хрупкие изломы с крупнозернистой поверхностью у практически недеформируемых материалов и гладкие изломы от сдвига, проходящие по направлению максимального касательного напряжения и связанные со значительной пластической деформацией.

К усталостным относятся изломы под действием переменных нагрузок, когда разрушение наступает после приложения большого числа циклов нагружения.

При работе изделий в условиях высоких температур важной характеристикой прочностной надежности является ресурс ползучести. Ползучесть - это явление, заключающееся в том, что металл, нагруженный при высокой температуре, непрерывно деформируется под воздействием постоянных во времени напряжений. В результате воздействия ползучести происходит ослабление сопротивления материала воздействию нагрузок. При этом напряжения, вызывающие разрушения, могут быть значительно меньше временного сопротивления при данной температуре.

Способность материала сопротивляться разрушению при воздействии высокой температуры и напряжений характеризуется пределом длительной прочности, т.е. напряжением, приводящим металл к разрушению (при данной температуре). При многократно повторяющихся температурных напряжениях наблюдается термическая (малоцикловая) усталость металла. Ползучесть и термическая усталость, как правило, взаимодействуют друг с другом. В качестве граничного напряжения, отделяющего "малоцикловую" усталость от "многоцикловой", обычно принимают напряжение, соответствующее числу циклов до разрушения порядка $10^4 \div 5 \cdot 10^4$.

При рассмотрении особенностей разрушения элементов с позиций трещинообразования обычно разграничиваются стадии возникновения и развития трещин.

На растровом электронном микроскопе удастся наблюдать начало процесса концентрации рассеянных микротрещин и перераспределение их в одну конечную трещину критического размера, которая под воздействием приложенных усилий после медленного роста переходит в катастрофическое состояние. Если обозначить N_0 - число циклов на стадии образования трещин, а N_c - число циклов, необходимых для развития критической трещины, то полное число циклов до разрушения N определяется по формуле:

$$N = N_0 + N_c.$$

Изнашивание является одной из основных причин отказов и предельных состояний. Изнашивание - процесс разрушения и отделения материала с

поверхности деталей и накопления остаточной деформации при трении, проявляющийся в постоянном изменении размеров и формы деталей. Результатом изнашивания является износ материала.

Под *трением* понимается явление сопротивления относительному перемещению, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним. По наличию и характеру движения различают следующие виды трения:

- трение покоя - трение двух тел при микро смещениях до перехода к относительному движению;
- трение движения - трение двух тел, находящихся в относительном движении.

По характеру относительного движения трение подразделяется на трение качения и трение скольжения.

По наличию смазочного материала трение подразделяется на трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом.

Трение и изнашивание сопровождается рядом явлений и процессов, приводящих к отказам на поверхностях трения:

- схватывание при трении - явление местного соединения двух твердых тел, происходящее вследствие действия молекулярных сил трения;
- перенос материала - явление при трении твердых тел, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго;
- заедание - процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала;
- задир - повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения;
- царапание - образование углублений на поверхности в направлении скольжения при воздействии выступов твердого тела или твердых частиц;
- отслаивание - процесс отделения поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании;
- выкрашивание - процесс образования ямок на поверхности трения в результате отделения части материала при усталостном изнашивании.

В результате процесса изнашивания происходит износ поверхностей. Значение износа, при котором изделие сохраняет работоспособность, называется допустимым износом. При определенной величине износа, называемого предельным, наступает отказ или предельное состояние изделия. Нарботка до отказа из-за износа определяется по величине скорости или интенсивности изнашивания. Скорость изнашивания - это отношение износа к интервалу времени, в течение которого он возник; обычно различают мгновенную (в определенный момент времени) и среднюю скорость изнашивания (за определенный интервал времени). Интенсивность изнашивания определяется как отношение износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполненной работы.

Различные виды изнашивания характеризуются следующими осо-

бенностями:

механическое изнашивание обусловлено только механическими воздействиями. Механическое воздействие может быть трех видов: при упругом контакте, пластическом деформировании и микрорезании. Механическое взаимодействие сопровождается возникновением напряжений в зоне контакта поверхностей, характеристикой поверхности являются показатели шероховатости;

упругое отклонение материала выступами неровностей происходит тогда, когда действующая нагрузка и адгезия не приводят к возникновению в зоне контакта напряжений, превосходящих предел текучести. Разрушение материала (износ) в этом случае возможно лишь в результате фрикционной усталости;

пластическое деформирование материала происходит, если контактные напряжения достигают предела текучести, но материал обтекает внедрившиеся выступы неровностей и на поверхности возникают глубокие вмятины. В этом случае износ является результатом малоциклового фрикционной усталости;

микрорезание происходит в тех случаях, когда контактные напряжения или деформации достигают разрушающих значений. При этом нарушается режим обтекания выступов деформируемым материалом, имеют место глубокие повреждения, разрушения хрупких стенок. В этом случае разрушение происходит с самого начала взаимодействия;

абразивное изнашивание представляет собой механическое изнашивание в результате режущего, царапающего или иного действия твердых тел или частиц. Твердые (абразивные) частицы могут быть неподвижно закреплены на одной из поверхностей трения, не закреплены, либо свободно перемещаться со смазкой в зазоре. В последнем случае говорят о гидроабразивном или газоабразивном изнашивании. Гидроабразивным называют изнашивание, происходящее в результате воздействия твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости. При этом механическое воздействие твердых частиц осуществляется в условиях разупрочняющего действия жидкой среды. Гидроабразивному изнашиванию подвергаются детали центробежных насосов, арматуры и др.;

газоабразивное изнашивание происходит в результате воздействия твердых тел или частиц, увлекаемых потоком газа, например, у компрессоров. Иногда выделяют эрозионное изнашивание, возникающее под воздействием трения и ударов высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Эрозионное изнашивание наблюдается в клапанах, золотниках, втулках, поршневых кольцах, форсунках;

усталостное изнашивание поверхностей трения или отдельных её участков происходит в результате повторного деформирования микрообъемов материала, приводящего к возникновению трещин и отдельных частиц. Такой вид изнашивания типичен для подшипников качения и шестерен. Механическое взаимодействие осуществляется микронеровностями контртела или трением качения (при небольшом проскальзывании). Изнашивание характеризуется накоплением субмикроразрушений и их развитием или многократным пластическим деформированием поверхностного слоя. Интенсивность и время

возникновения выкрашивания материала определяется величиной контактных напряжений, числом циклов нагружения, твердостью материала, состоянием микрогеометрии поверхности и толщиной смазочного слоя;

по мере увеличения числа циклов нагружения в процессе работы узла трения усталостное выкрашивание приводит к образованию раковин. При этом возникают шум и вибрация в узлах трения, уменьшается величина несущей поверхности трущихся деталей, повышаются контактные напряжения, увеличивается пластическая деформация, возникает повышенный износ. Возможно образование задних поверхностей в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения;

кавитационное изнашивание поверхности происходит при относительном движении твердого тела и жидкости в условиях кавитации. При этом поверхностный слой подвергается высокочастотным локальным гидравлическим ударам в кавитационной области потока жидкости, оказывающей одновременно разупрочняющее действие. Кавитационному изнашиванию подвергаются омываемые рабочей жидкостью детали и поршневых насосов, запорные устройства. Молекулярно-механическое изнашивание происходит в результате одновременного воздействия механических и молекулярных или атомных сил. Типичным его видом является изнашивание при заедании, которое происходит в результате схватывания и глубинного выравнивания материалов, переноса материалов с одной поверхности трения на другую и воздействию возникших неровностей на сопряженную поверхность;

коррозионно-механическое изнашивание происходит при трении материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой.

Этот вид изнашивания включает в себя окислительное изнашивание при фретинг-коррозии;

коррозионно-химическое изнашивание происходит в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим или электрохимическим взаимодействием с агрессивной средой;

окислительное изнашивание происходит при наличии на поверхности трения защитных пленок, образующихся в результате взаимодействия материала со средой. Окислительное изнашивание происходит тогда, когда поверхности подвержены воздействию кислорода, воздуха или кислорода, содержащегося в смазке; на соприкасающихся поверхностях образуются и разрушаются пленки окислов; продукты износа состоят из этих окислов;

изнашивание при фретинг-коррозии представляет собой коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных перемещениях. Этот вид изнашивания имеет место при контакте двух сопряженных деталей при колебательных относительных перемещениях с малой амплитудой и окислении продуктов изнашивания, не удаленных с поверхности контакта;

изнашивание при фретинг-коррозии развивается при прессовых посадках на вращающихся валах, в местах посадки лопаток турбин и компрессоров, в шлицевых, шпоночных, болтовых, винтовых и заклепочных соединениях, в

подшипниках качения, кулачковых и шарнирных механизмах и т.п.;

В большинстве практических случаев процесс износа носит сложный характер и одновременно наблюдается несколько видов изнашивания.

Коррозия является одной из наиболее распространенных причин отказов изделий. Коррозия - это разрушение металла вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой (агрессивная атмосфера, растворы кислот, щелочей, солей и т.п.).

Коррозия металлов классифицируется по ряду признаков.

По характеру взаимодействия металла со средой:

- химическая коррозия - взаимодействие металла с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды протекают в одном акте;

- электрохимическая коррозия - взаимодействие металла с коррозионной средой (раствором электролитов), при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительной компоненты протекают не в одном акте и их скорость зависит от электродного потенциала.

По типу коррозионной среды:

- газовая коррозия - химическая коррозия металла в газах при высоких температурах;

- атмосферная коррозия - коррозия металла в атмосфере в условиях любого влажного газа;

- коррозия внешним током – электрохимическая коррозия под воздействием тока от внешнего источника;

- коррозия блуждающим током - электрохимическая коррозия под воздействием блуждающего тока;

- контактная коррозия - электрохимическая коррозия, вызванная контактом металлов, имеющих разные стационарные потенциалы в данном электролите;

- коррозия при трении - разрушение металла, вызываемое одновременным воздействием коррозионной среды и трения;

- фреттинг-коррозия - коррозия при колебательном перемещении двух поверхностей относительно друг друга в условиях воздействия коррозионной среды.

По геометрическим характеристикам коррозионных разрушений:

- сплошная, охватывающая всю поверхность металла;

- равномерная, неравномерная, протекающая соответственно с одинаковой скоростью по поверхности металла и неодинаковой скоростью на различных участках поверхности;

- местная коррозия, которая подразделяется на подповерхностную коррозию (начинается на поверхности и распространяется под поверхностью материала), точечную коррозию (в виде отдельных точечных поражений), коррозию пятнами (в виде отдельных пятен), сквозную коррозию (вызывает разрушение металла насквозь).

По видам распространения:

- послойная коррозия, распространяющаяся преимущественно в

направлении пластической деформации металла;

- нитевидная коррозия, распространяющаяся в виде нитей преимущественно под неметаллическими защитными покрытиями;
- структурная коррозия, связанная со структурной неоднородностью металла;
- межкристаллитная, распространяющаяся по границам кристаллов (зерен) металла.

В зависимости от сочетания процесса коррозии с другими видами воздействия на изделие:

- коррозионное растрескивание, происходящее при одновременном воздействии коррозионной среды и внешних или внутренних механических напряжений растяжением с образованием транскристаллитных или межкристаллитных трещин;
- коррозия под напряжением, протекающим при одновременном воздействии коррозионной среды и постоянных или переменных механических напряжений;
- коррозионная усталость - понижение предела усталости металла, возникающее при одновременном воздействии циклических растягивающих напряжений и коррозионной среды;
- коррозионная хрупкость – хрупкость, приобретенная металлом в результате коррозии.

3. МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ

3.1. Модели развития повреждений и возникновение отказов

Для оценки надежности необходимо составить модели процессов развития повреждений и возникновения отказов. Каждый объект можно характеризовать параметром η , определяющим его работоспособность. В общем случае параметр $\eta(t)$ может быть векторным, т.е. иметь несколько составляющих. Определяющий параметр, случайно изменяясь в процессе работы (хранения), может достигнуть предельно-допустимого значения, после которого состояние объекта считается неработоспособным (возникает отказ).

В каждом из множества однотипных объектов процессы изменения параметров протекают различно. Для наугад выбранного объекта процесс изменения определяющего параметра $\eta(t)$ можно рассматривать как случайную функцию времени или наработки. Для каждого конкретного i -го объекта, из множества одинаковых, изменение параметра можно рассматривать как реализацию $\eta_j(t)$ случайной функции $\eta(t)$. Точки пересечения реализаций случайного процесса с границей поля допуска соответствуют наработке объекта до отказа.

При изменении определяющего параметра наряду с постепенными наблюдаются и внезапные отказы объектов.

Можно считать, что при внезапных отказах происходит резкое, практически мгновенное изменение определяющих параметров. Внезапным отказам соответствуют разрывы реализаций $\eta_j(t)$ случайной функции $\eta(t)$ (рис. 3.1).

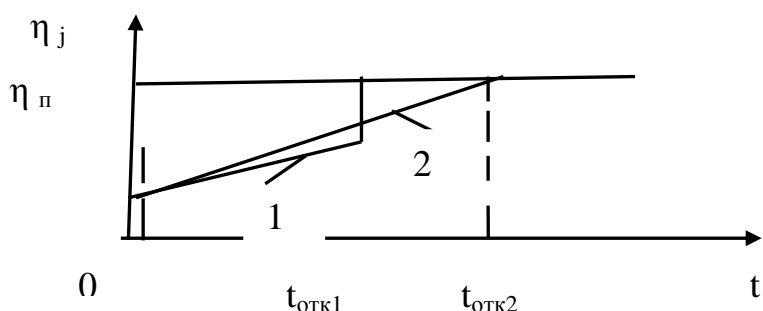


Рис. 3.1. Реализации случайного процесса изменения параметра:
1 - при внезапном отказе; 2 - при постепенном отказе элемента

Изменение определяющих параметров механических систем часто связано с износом деталей или усталостными разрушениями. Эти процессы, как правило, протекают монотонно.

Если перемешивание реализаций сильное, то для каждого конкретного экземпляра объекта прогнозирование должно осуществляться по наихудшему из практически возможных вариантов (рис.3.2а). В этом случае допускается, что из любого состояния (А, Б) возможен почти мгновенный переход реализации на верхнюю доверительную границу изменения параметра совокупности однотипных объектов.

Если перемешивание реализаций слабое (рис. 3.2б), то для каждой отдельной реализации можно определить доверительные границы, отличные от доверительных границ всей совокупности.

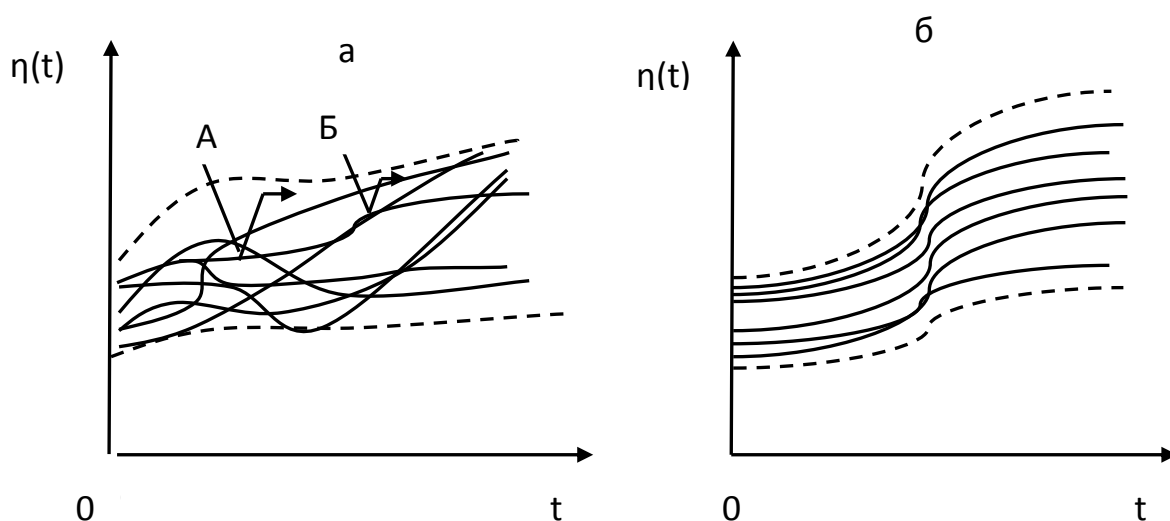


Рис. 3.2. Случайный процесс изменения параметра с различной степенью:
перемешивания реализаций: а - сильное перемешивание; б - слабое
перемешивание

Для количественной оценки степени перемешивания реализаций случайного процесса применяют числовую характеристику $R(t_1, t)$, называемую нормированной корреляционной функцией, которая является коэффициентом корреляции между значениями рассматриваемой функции в двух сечениях

процесса $\eta(t)$ и вычисляется по формуле:

$$R_{t_1, t} = \frac{\sum_{i=1}^n (\eta_{1i} - \bar{\eta}_1) \cdot (\eta_i - \bar{\eta})}{n \cdot \sigma_1 \cdot \sigma}, \quad (3.1)$$

где η_{1i}, η_i – значение параметра i -го экземпляра объекта при наработке t_1 и текущей наработке t соответственно;

$\bar{\eta}_1, \bar{\eta}$ – средний износ при наработке t_1 и t соответственно;

σ_1, σ – среднее квадратическое отклонение при наработке t_1 и t соответственно;

n – число экземпляров объектов.

Когда нормированная корреляционная функция близка к единице, перемешивание реализаций слабое, когда же она близка к нулю, перемешивание сильное.

Значение нормированной корреляционной функции, например, для процесса изнашивания шлицевых соединений двигателя в реальных условиях эксплуатации остается достаточно высоким на протяжении большого периода работы узлов трения. Во всех исследованиях $R(t_1, t)$ была выше 0,6, что свидетельствует о слабом перемешивании реализаций и принципиальной возможности индивидуального прогнозирования.

Для формального описания процесса изнашивания определяющих параметров могут быть использованы различные модели.

При постоянной скорости изнашивания, определяющей параметры отдельных реализаций, получим линейную модель (рис. 3.3)

$$\eta(t) = \alpha t + \beta,$$

$$\alpha = \frac{\eta_n - \beta}{t_{отк}},$$

$$t_{отк} = \frac{\eta_n - \beta}{\alpha},$$

где β – начальное значение параметра при $t = 0$;

α – скорость изменения параметра.

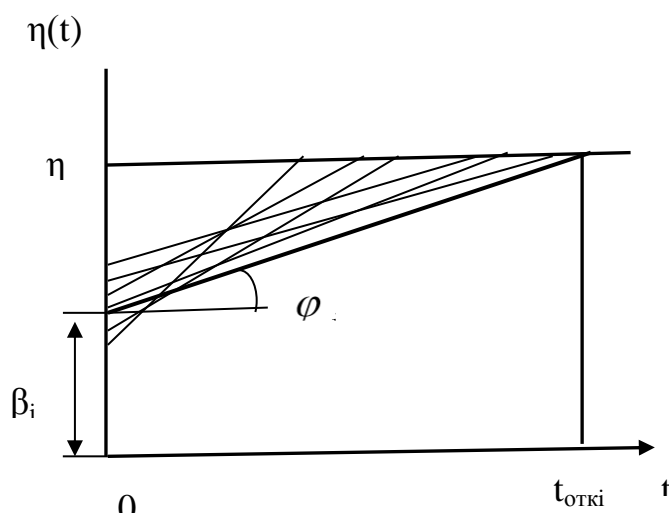


Рис. 3.3. Линейная модель изменения параметра

При скорости изменения параметра v , пропорциональной η

$$v = \frac{d\eta}{dt} = C + K\eta, \quad (3.2)$$

используется экспоненциальная модель.

Интегрируя левую и правую части (3.2) соответственно по времени и износу и принимая, что при наработке t_1 средняя величина износа $\bar{\eta}_1$, получим экспоненциальную модель:

$$\begin{aligned} t - t_1 &= \frac{1}{K} \ln \frac{C + K\bar{\eta}}{C + K\bar{\eta}_1}, \\ \bar{\eta} &= \bar{\eta}_1 + \frac{C}{K} e^{t-t_1 K} - \frac{C}{K}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Обозначив $\frac{1}{K \ln e} = A$, $\frac{C}{K} = h$ и подставив их в выражение (3.3), получим:

$$\bar{\eta} = \eta_1 + h \cdot 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h. \quad (3.4)$$

Коэффициент A , измеренный в единицах наработки, определяет форму кривой износа и получил название коэффициента долговечности. Коэффициент h , называемый коэффициентом смещения, измеряется в единицах параметра (износа) и определяет положение кривой.

Для верхней доверительной границы процесса изменения параметра справедливо выражение

$$\eta' = (\bar{\eta}_1 + t_\beta \sigma + h) \cdot 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h, \quad (3.5)$$

где $\bar{\eta}_1, \sigma$ – среднее значение и среднее квадратическое отклонение параметра при t_1 соответственно; t_β – табличный коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности β .

Нижняя доверительная граница процесса изменения параметра определяется уравнением

$$\eta'' = (\bar{\eta}_1 + t_\beta \sigma_1 + h) \cdot 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h. \quad (3.6)$$

Уравнения (3.5, 3.6) должны ограничивать поле, в пределах которого заключено не менее $\beta \cdot 100\%$ всех возможных значений параметров исследуемых элементов.

Коэффициенты A и K определяются выражениями:

$$A = \frac{t_2 - t_1}{lg \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}, \quad h = \frac{\bar{\eta}_2 - \bar{\eta}_1 \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1},$$

где $\bar{\eta}_2, \sigma_2$ – среднее значение и среднее квадратическое отклонение в момент t_2 соответственно; $\frac{\sigma_1}{\sigma}$ – отношение среднего квадратического отклонения ошибки прогноза параметра конкретного элемента к среднему квадратическому отклонению параметра совокупности элементов.

Если бы перемешивание реализаций процесса изменения параметров полностью отсутствовало, то нормированная корреляционная функция равнялась бы единице, а любую отдельную реализацию процесса можно было бы описать уравнением, по структуре похожим на (3.4) и полученным из него путем замены среднего значения параметра величиной параметра конкретного экземпляра элемента. В действительности же наблюдаются некоторые отклонения

фактических значений параметров от прогнозируемых.

Значение среднего отклонения близко к нулю, а дисперсия отклонения фактического значения параметра для конкретного экземпляра элемента, вычисленного по уравнению (3.4), существенно меньше дисперсии параметра всей совокупности элементов. Это дает основание записать для верхней доверительной границы конкретного элемента

$$\eta_j = \eta_{1j} + ft_\beta \sigma_1 + h \cdot 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h. \quad (3.7)$$

Коэффициент получил название коэффициента перемешивания реализаций, связь его с нормированной корреляционной функцией имеет вид

$$f = \frac{1 - R^2(t_1, t)}{2}.$$

Прогнозирование параметра конкретного экземпляра элемента по уравнению (3.7) целесообразно при $R(t_1, t) > 0,5$.

3.2. Модели надежности невосстанавливаемых объектов

В процессе эксплуатации объекты подвергаются воздействию широкого спектра факторов, имеющих не только переменный, но зачастую и случайный характер. Поэтому отказ объекта является случайным событием, а время работы (наработка) объекта до отказа представляет собой случайную величину. Хотя сами события являются случайными, распределения их вероятностей имеют определенные закономерности. Теория вероятностей и изучает вероятностные закономерности массовых случайных событий.

Установление этих закономерностей часто основано на изучении статистических данных - результатах наблюдений. Способами сбора и группировки статистических данных и методами их анализа занимается математическая статистика. Поэтому теория надежности использует методы теории вероятностей и математической статистики.

Для невосстанавливаемых объектов приходится иметь дело с наработкой до отказа τ . Предположим, что τ является случайной величиной с функцией распределения $F(t) = P(\tau < t)$.

Предположим также, что $F(t)$ абсолютно непрерывна и имеет плотность распределения

$$f(t) = F'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{\Delta t}.$$

Тогда для функции распределения $F(t)$ получим

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

Дополнительная вероятность

$$P(t) = 1 - F(t) = P(\tau > t)$$

называется вероятностью безотказной работы

Функция $P(t)$ может быть выражена через плотность распределения

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (3.8)$$

Рассмотрим основные свойства интегральных функций $F(t)$ и $P(t)$ (рис. 3.4):

$$\begin{aligned} \text{при } t=0, & \quad F(0)=0, \quad P(0)=1; \\ \text{при } t=\infty, & \quad F_{\infty}=1, \quad P_{\infty}=0. \end{aligned}$$

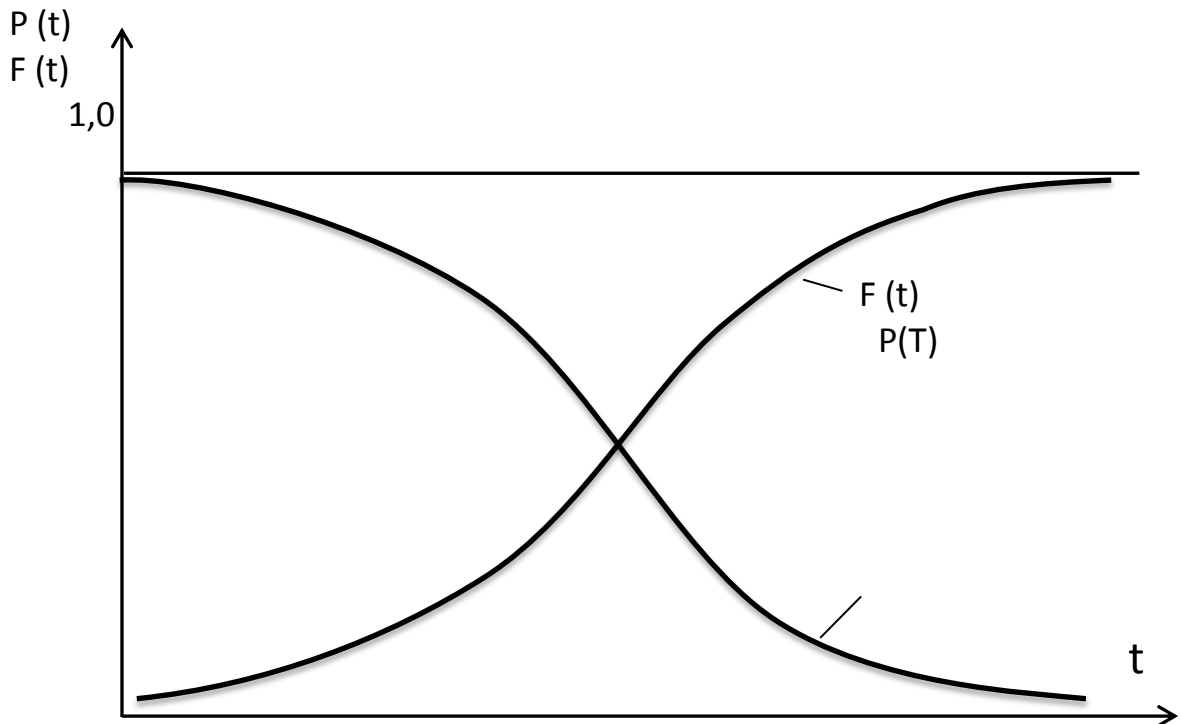


Рис.3.4. Функции распределения $F(t)$ и $F(t)$

Вероятность попадания случайной величины в любой интервал времени от a до b

$$P(a \leq t \leq b) = \int_a^b f(t) dt = F(b) - F(a).$$

Важной характеристикой надежности объекта является условная плотность вероятности отказа

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (3.9)$$

называемая интенсивностью отказа.

Рассмотрим моменты времени t и $(t + \Delta t)$. Вероятность безотказной работы до момента t будет $P(t)$, а до момента $(t + \Delta t)$ $P(t + \Delta t)$.

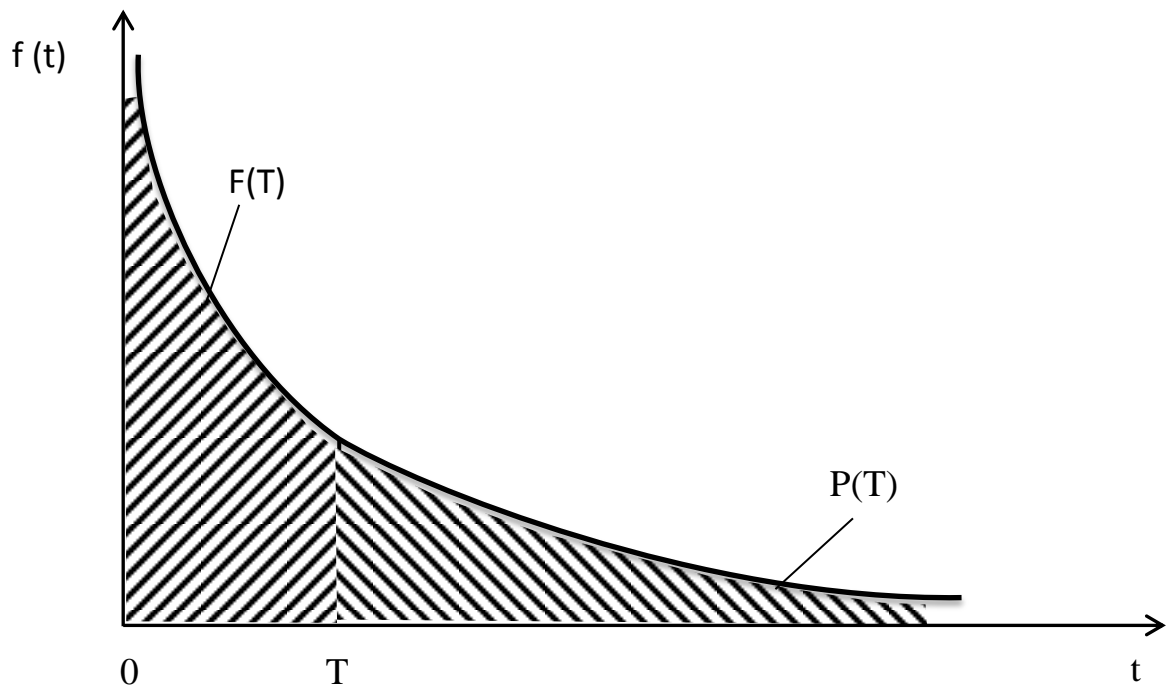
Условная вероятность безотказной работы объекта от t до $(t + \Delta t)$

$$P_t \Delta t = \frac{P(t + \Delta t)}{P_t} \quad (3.10)$$

при условии, что в момент t объект работоспособен.

Свойства дифференциальной функции $f(t)$ (рис. 3.5)

$$f(t) \geq 0, \quad \int_0^{\infty} f(t) dt = 1.$$

Рис. 3.5. Плотность распределения $f(t)$

Вычитая обе части уравнения (3.10) из единицы и разделив их на Δt , получим

$$\frac{1 - P_t \Delta t}{\Delta t} = - \frac{P_t t + \Delta t - P(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P(t)}$$

В левой части стоит вероятность отказа объекта в единицу времени после момента t , при условии, что до момента t изделие не отказало.

Тогда интенсивность отказа

$$\lambda t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} - \frac{P_t t + \Delta t - P(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P(t)} = - \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} \quad (3.11)$$

Из (3.11), учитывая, что $-\frac{dP(t)}{dt} = f(t)$, получим выражение (3.9).

Функции $F(t)$, $P(t)$, $f(t)$ являются полными характеристиками моделей надежности невосстанавливаемых объектов. Важными числовыми величинами, характеризующими надежность, являются:

математическое ожидание наработки до отказа (рис. 3.6):

$$m_t = M\tau = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (3.12)$$

дисперсия наработки до отказа

$$D\tau = M(\tau - T)^2 = \sigma_t^2 = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - m_t^2. \quad (3.13)$$

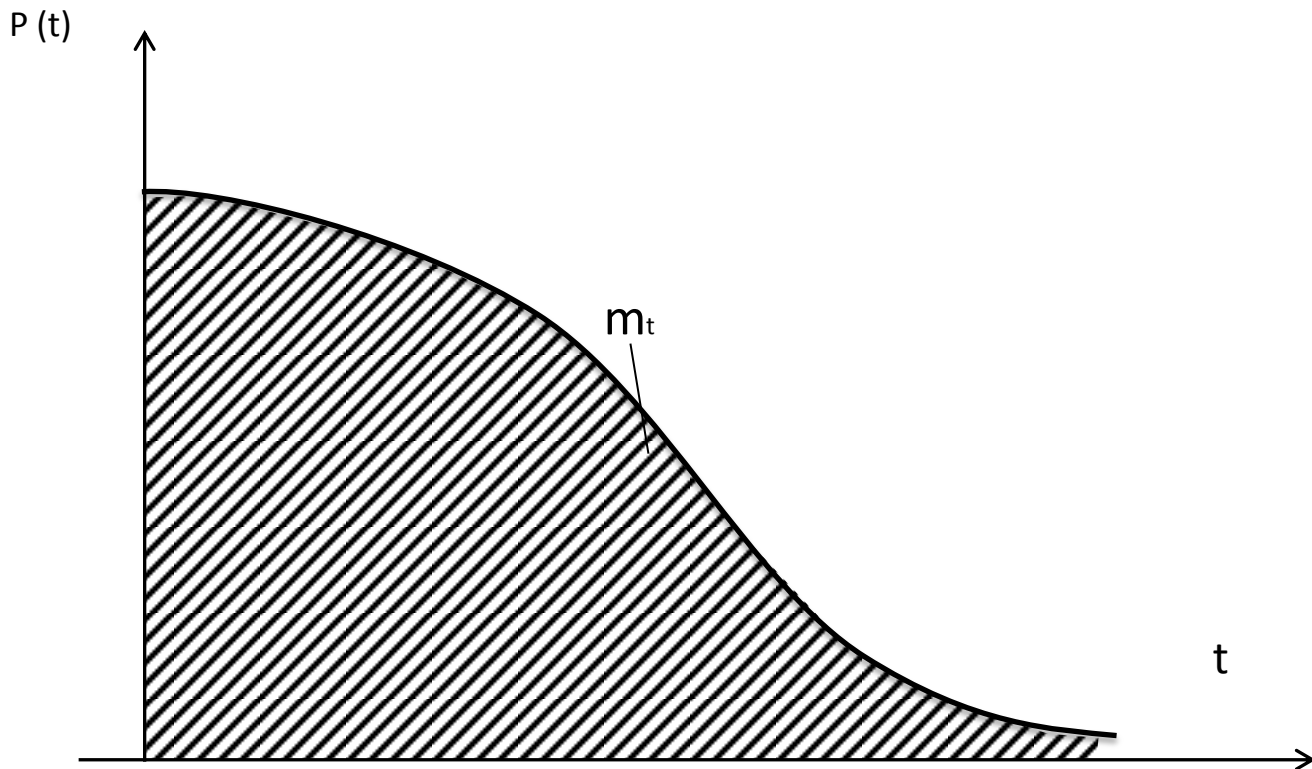


Рис. 3.6. Математическое ожидание наработки до отказа

Распределение Вейбулла является довольно гибкой моделью, описывающей статистические закономерности отказов механических объектов, подшипников качения, по параметрам прочности и усталостной долговечности и др. Применяется при ускоренных испытаниях объектов, в период приработки - это распределение непрерывной случайной величины t , которая может принимать только положительные значения $t \geq 0$.

В теории надежности находят применение различные функции (законы) распределения непрерывных случайных величин. Рассмотрим законы распределения, получившие наибольшее распространение.

Плотность распределения наработки до отказа для распределения Вейбулла имеет вид (рис. 3.7)

$$f(t) = \frac{b}{a} t^{b-1} \cdot e^{-\frac{t^b}{a}}, \quad (3.14)$$

где a – параметр масштаба; b – параметр формы.

Функция распределения наработки до отказа $F(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$ определяются из выражений

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t^b}{a}}, \quad (3.15)$$

$$P(t) = e^{-\frac{t^b}{a}}. \quad (3.16)$$

Интенсивность отказов имеет вид (рис. 3.8). Интенсивность отказов при $b < 1$ убывает, при $b = 1$ постоянна и при $b > 1$ возрастает.

Математическое ожидание m_t и среднее квадратическое отклонение σ_t наработки до отказа

$$m_t = d_b a^{\frac{1}{b}}, \quad (3.18)$$

$$\sigma_t = C_b a^{\frac{1}{b}}, \quad (3.19)$$

где $d_b = \Gamma(\frac{1}{b} + 1)$, $C_b = \frac{\Gamma(1 + \frac{2}{b})}{\Gamma^2(\frac{1}{b} + 1)}$, $\Gamma \cdot$ – гамма функция.

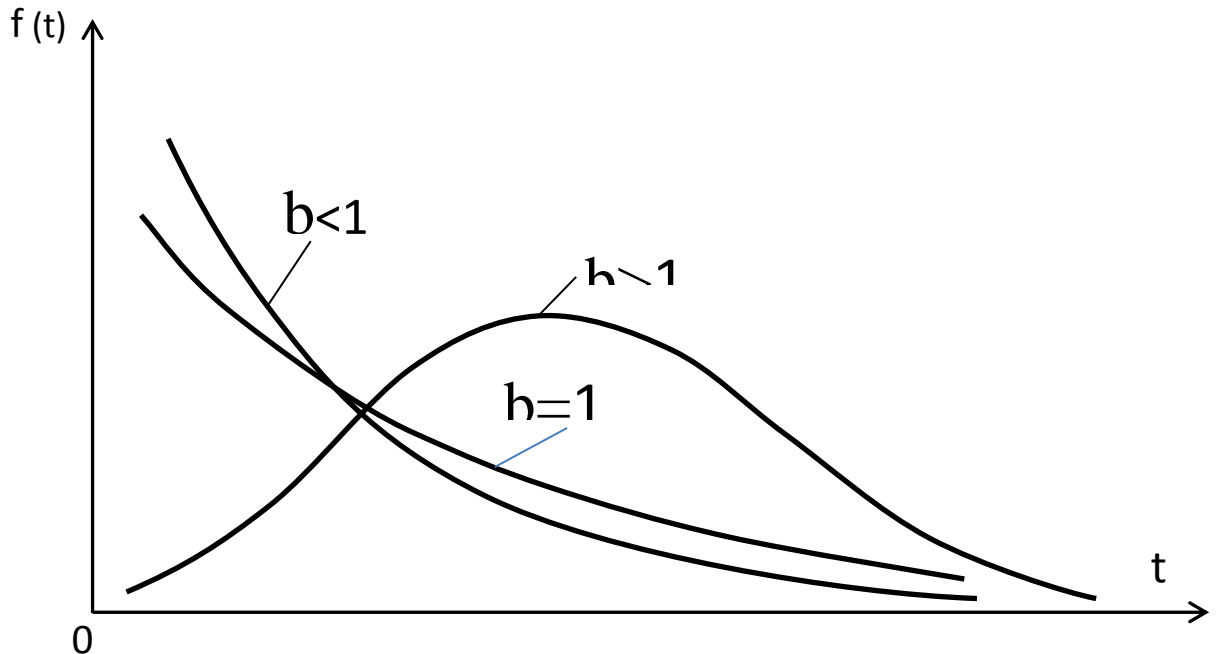


Рис. 3.7. Плотность распределения Вейбулла

Экспоненциальное распределение пригодно для описания наработки невосстанавливаемого объекта до внезапного отказа.

Плотность распределения $f(t)$ (рис. 3.9 а) может рассматриваться как частный случай распределения Вейбулла (3.14) при $b = 1$ и $\lambda = \frac{1}{a}$:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad t \geq 0. \quad (3.20)$$

Параметром экспоненциального распределения является интенсивность отказов λ (рис. 3.9 в).

Функция распределения $F(t)$, вероятность безотказной работы $P(t)$ имеют вид

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \quad (3.21)$$

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}. \quad (3.22)$$

Математическое ожидание m_t и среднее квадратическое отклонение σ_t для экспоненциального распределения равны между собой

$$m_t = \sigma_t = \frac{1}{\lambda}.$$

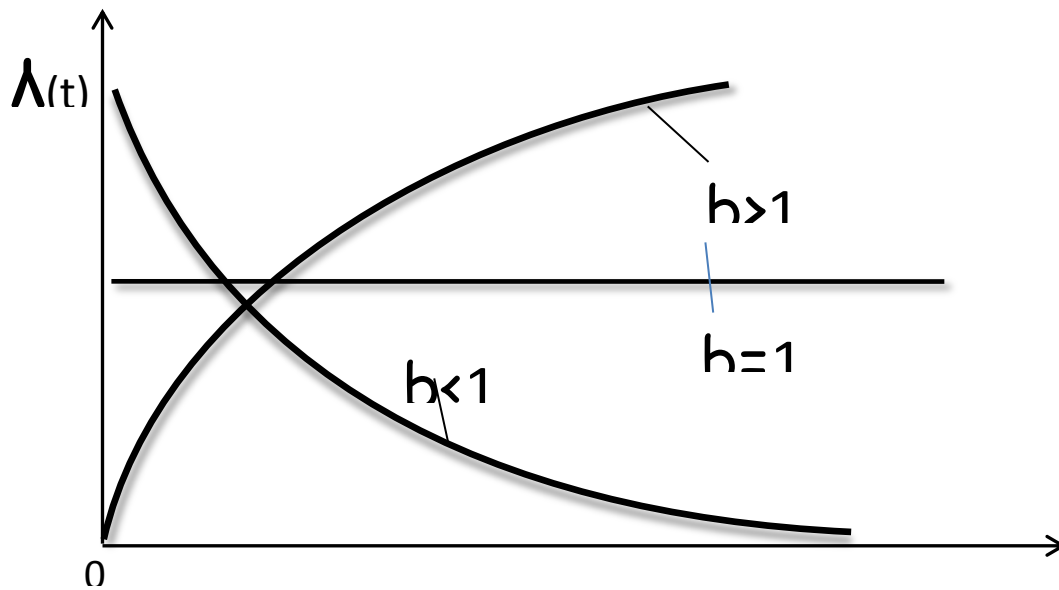


Рис. 3.8. Интенсивность отказов для распределения Вейбулла

Усеченное нормальное распределение применяется при постепенных отказах износового характера. Часто условием нормального распределения наработки до отказа является малый разброс значений скорости изнашивания элементов. При нормальном распределении случайной величины она может принимать значения от $-\infty$ до $+\infty$. Поскольку возможные значения случайной наработки до отказа t могут быть только положительными, распределение t может быть лишь усеченным нормальным.

Усеченным нормальным распределением случайной величины называется распределение, полученное из нормального при ограничении интервала возможных значений этой величины. Так как возможные значения случайной величины t ограничены интервалом (t_1, t_2) , то плотность усеченного распределения

$$\bar{f}(t) = C f(t),$$

где $f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp -\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}$ — плотность неусеченного распределения,

C — нормирующий множитель, находимый из условия, что площадь под кривой распределения равна единице, т.е.

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = 1$$

или

$$C = \frac{1}{\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt}. \quad (3.23)$$

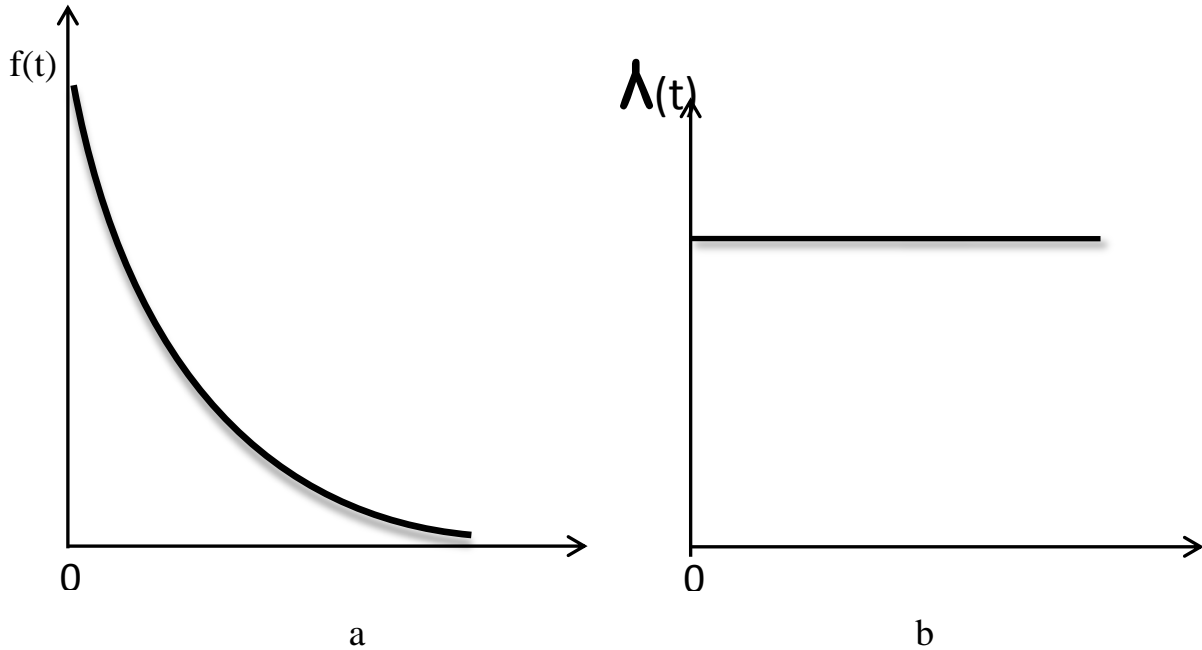


Рис. 3.9. Плотность вероятности $f(t)$ (а) и интенсивность отказов $\lambda(t)$ (б) экспоненциального распределения

Подставив в (3.23) выражение для $f(t)$ и применив подстановку $U = \frac{t - m_t}{\sigma_t}$, где m_t — математическое ожидание и σ_t — среднее квадратическое отклонение не усеченного распределения, после преобразования получим:

$$C = \frac{1}{\Phi(u_2) - \Phi(u_1)}, \quad (3.24)$$

где $\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U \exp(-\frac{v^2}{2}) dv$ — нормированная функция Лапласа, значения которой приведены в таблицах.

Функция распределения $F(t)$ и вероятности безотказной работы при

$$t_1 < t < t_2$$

$$\bar{F}(t) = 1 - C \left[0,5 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right) \right], \quad (3.25)$$

$$\bar{P}(t) = C \left[0,5 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right) \right].$$

Интенсивность отказов

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

Для возможных значений случайной величины в интервале $(0, \infty)$ имеем

$$C = \frac{1}{0,5 + \Phi(m_t / \sigma_t)} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \bar{m}_t &= m_t + \sigma_t k_0, \\ \bar{\sigma}_t^2 &= \sigma_t^2 \left(1 - k_0^2 - k_0 \frac{m_t}{\sigma_t} \right), \end{aligned} \quad (3.27)$$

где $k_0 = \frac{c}{2\pi} \exp -0,5 \left(\frac{m_t}{\sigma_t} \right)^2$.

Характеристики усеченного (не усеченного) нормального распределения приведены на рис. 3.10.

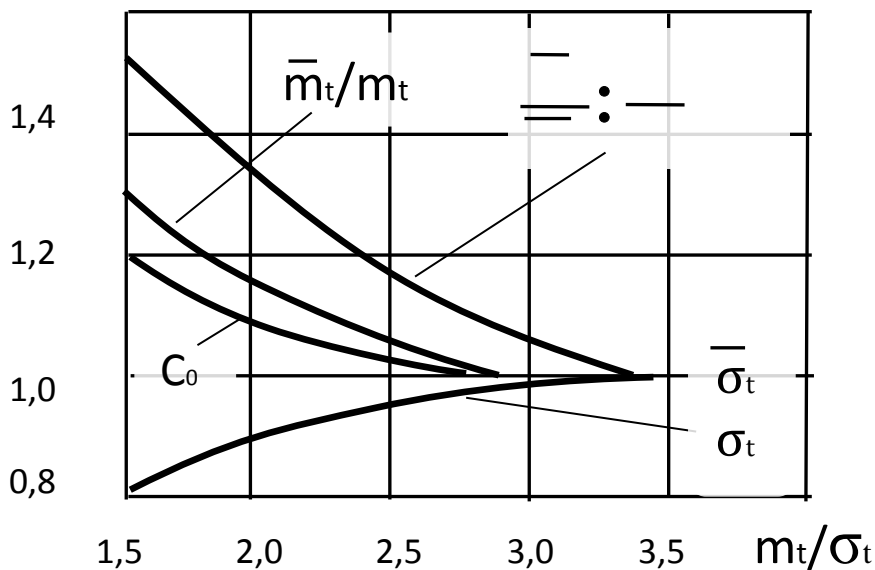


Рис. 3.10. Зависимость отношений числовых характеристик усеченного и не усеченного нормального распределений и нормирующего множителя C_0 от отношения $\frac{m_t}{\sigma_t}$. \bar{m}_t , $\bar{\sigma}_t$ означают характеристики усеченного распределения.

При $\frac{m_t}{\sigma_t} > 2$, что обычно имеет место на практике, значение C_0 очень мало отличается от единицы и $\bar{m}_t \approx m_t$, $\bar{\sigma}_t \approx \sigma_t$. В этом случае можно использовать неусеченное нормальное распределение. Плотность распределения и интенсивность отказов для нормального распределения приведены на рис. 3.11.

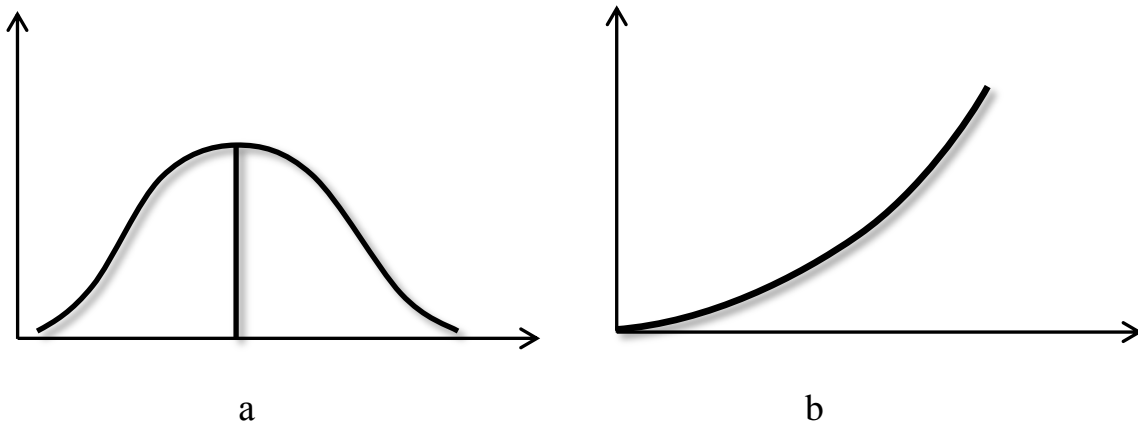


Рис. 3.11. Плотность вероятности $f(t)$ (а) и интенсивность отказов $\lambda(t)$ (б) нормального распределения

3.3. Модели надежности восстанавливаемых объектов

Восстанавливаемые изделия отличаются от невосстанавливаемых тем, что невосстанавливаемое изделие может иметь только один отказ, а восстанавливаемое - много отказов. Поэтому при рассмотрении надежности восстанавливаемых объектов мы имеем дело с потоком случайных событий (отказов), т.е. совокупности событий, упорядоченных по времени их наступления.

При эксплуатации восстанавливаемого объекта происходит последовательная смена интервалов времени работы τ_i и восстановления τ_{bi} (рис. 3.12 а). Интервалы времени τ_i характеризуют безотказность объектов, чем они больше, тем безотказность выше. Интервалы τ_{bi} характеризуют ремонтпригодность объектов, чем они меньше, тем ремонтпригодность выше.

При рассмотрении безотказности объектов можно расположить интервалы на оси наработки (рис. 3.12 б). К такому же виду процесса мы придём, если примем восстановления мгновенными.

Поток событий может быть задан двумя способами.

Во-первых, путем рассмотрения случайных интервалов времени между начальным моментом и моментом наступления первого события τ_1 , моментами наступления первого и второго событий потока τ_2 , i -го τ_i и $(i + 1)$ -го τ_{i+1} и т.д. Предполагается, что случайные величины τ_1, τ_2, \dots взаимно независимы.

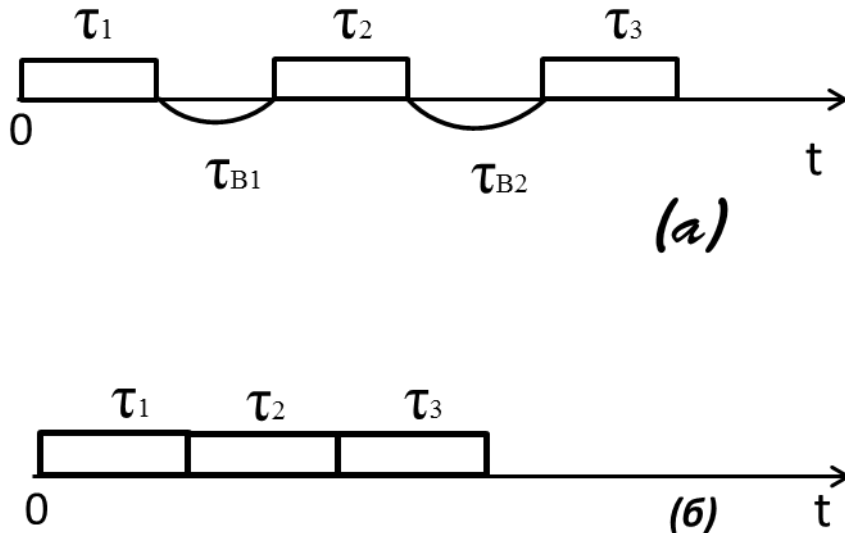


Рис. 3.12. Потоки случайных событий: а – поток отказов и восстановлений; б – поток отказов

Если, кроме того, они одинаково распределены, то такой процесс называется простейшим процессом (потоком) восстановления. В этом случае можно использовать X в качестве общего символа этих случайных величин и свести проблему к изучению отдельной случайной величины. В частности, X может иметь любое из приведенных выше распределений непрерывной случайной величины. Как и прежде характеристиками величины X будут функции $X(t)$, $P(t)$, $f(t)$, λt , m_t , σ_t .

Второй способ задания потока событий состоит в рассмотрении случайного числа событий $r(t)$, имевших место от начального момента времени до текущего момента t , т.е. в интервале $(0, t)$. Отличие этой случайной величины r заключается в том, что она зависит от времени t , т.е. действительно является случайным процессом. Достаточно полную характеристику процесса дает распределение *дискретной случайной величины* $r(t)$ при любых значениях t :

$$P_r(t) = P\{r(t) = r\} = P_r(t), \quad r = 0, 1, \dots$$

За время t будет иметь место ровно r отказов $r > 0$ в том и только в том случае, если время, необходимое для появления r первых событий (т.е. $\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_r$), меньше t , а $(r + 1)$ -го события (т.е. $\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_r + \tau_{r+1}$) больше t . Это позволяет установить связь между двумя способами задания случайного потока отказов.

$$P_r(t) = P\left\{\sum_{i=1}^r \tau_i \leq t\right\} - P\left\{\sum_{i=1}^{r+1} \tau_i \leq t\right\}, \quad i > 0.$$

Ясно также, что $P_0(t) = P\{\tau_1 > t\}$.

Таким образом, при втором способе задания потока событий мы имеем дело с распределением дискретных случайных величин.

При втором способе задания случайного потока используются следующие характеристики:

$\Omega(t)$ - математическое ожидание числа отказов за время t ;

$\omega(t)$ - параметр потока отказов.

Рассмотрим моменты времени t и $(t + \Delta t)$. Величина $\Delta\Omega(t)$ представляет собой приращение среднего числа отказов $\Omega(t)$ за время Δt , т.е. среднее число отказов от момента t до момента $(t + \Delta t)$.

Т.е. параметр потока отказов представляет собой среднее число отказов в единицу времени после момента t .

$$\omega t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Omega(t + \Delta t) - \Omega(t)}{\Delta t} = \frac{d\Omega(t)}{dt}.$$

Тогда

$$\Omega t = \int_0^t \omega t dt. \quad (3.28)$$

Если из партии N объектов, из которых R дефектных, случайным образом извлечена выборка объемом n , то для определения вероятности $P_{n,r}$ того, что в выборке будет точно r дефектных объектов, можно использовать гипергеометрическое распределение

$$P_{n,r} = \frac{\tilde{N}_R^r \tilde{N}_{N-R}^{n-r}}{\tilde{N}_N^n}, \quad 0 \leq r \leq n, \quad 0 \leq R \leq N,$$

где $\tilde{N}_R^r, \tilde{N}_N^n, \tilde{N}_{N-R}^{n-r}$ - число сочетаний из R по r , из N по n и из $N - R$ по $n - r$ соответственно.

Число сочетаний C_R^r определяется по формуле

$$\tilde{N}_R^r = \frac{R!}{r!(R-r)!},$$

аналогично вычисляются $\tilde{N}_N^n, \tilde{N}_{N-R}^{n-r}$.

Гипергеометрическое распределение характеризуется тремя параметрами N, R, n (величина r является случайной переменной).

Математическое ожидание m_r и среднее квадратическое отклонение σ_r случайной величины r запишутся в виде:

$$m_r = np, \\ \sigma_r = \sqrt{npq \left(1 - \frac{n-1}{N-1}\right)},$$

где $p = \frac{n}{N}$, $q = 1 - p$.

При больших значениях N вычисление $P_{n,r}$ затруднительно.

Однако при $N \rightarrow \infty$ и постоянном $P = \frac{R}{N}$ гипергеометрическое распределение сходится к биномиальному.

При $n < 0,1N$ гипергеометрическое распределение становится настолько

близким к биномиальному, что на практике можно пренебречь различиями между ними.

Пусть при проверке n объектов выявлено r дефектных. Вероятность $P_{r,n}$ того, что ровно r из n объектов будут дефектными ($r \leq n$) определяется с использованием биномиального распределения

$$P_{r,n} = C_n^r p^r q^{n-r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} p^r q^{n-r}, \quad (3.29)$$

где $p = \frac{n}{N}$, $q = 1 - p$.

Вероятность того, что при проверке n объектов не будет выявлено ни одного дефектного, определяется из (3.29)

$$P_{0,n} = q^n.$$

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение при биномиальном распределении запишется в виде

$$m_r = np, \quad (3.30)$$

$$\sigma_r = \sqrt{npq}. \quad (3.31)$$

Если доля дефектных объектов меньше 10% ($P < 0,1$), то хорошим приближением к биномиальному распределению может служить распределение Пуассона. Оно применимо при малых n и np

$$P_{r,n} = \frac{a^{np}}{r!} e^{-np} \quad (3.32)$$

Распределение Пуассона имеет существенное преимущество перед биномиальным, там вместо двух параметров n и P в (3.32) имеем один параметр $a=np$

$$P_{r,n} = \frac{a^r}{r!} e^{-a}. \quad (3.33)$$

Для вычисления вероятностей $P_{r,n}$ и при распределении Пуассона удобно пользоваться рекуррентной формулой:

$$P_{(r+1),n} = \frac{a}{(r+1)} P_{r,n}.$$

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайной величины r при распределении Пуассона.

$$m_r = a, \quad (3.34)$$

$$\sigma_r = \sqrt{a}. \quad (3.35)$$

Математическое описание реальных потоков отказов является весьма сложной задачей. Однако многие из них можно заменить потоками, которые обладают свойствами, позволяющими найти более простой способ их изучения.

Рассмотрим потоки, обладающие этими свойствами:

1) стационарности, если вероятность появления того или иного числа отказов на интервале времени θ зависит только от величины интервала и не зависит от того, где именно на оси $0, t$ расположен этот интервал;

2) отсутствия после действия, если для любых непересекающихся интервалов времени число отказов, появляющихся на одном из них θ_3 , не зависит от числа отказов, появившихся на других интервалах θ_1, θ_2 ;

3) ординарности, если вероятность появления на элементарном интервале времени Δt двух и более отказов пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного отказа.

Поток, удовлетворяющий всем трем свойствам, называется простейшим. Близкие к нему по структуре потоки отказов встречаются в реальных условиях эксплуатации. Отказы, образующие простейший поток, распределены по закону Пуассона.

Поток отказов, обладающий свойствами ординарности отсутствия после действия, но не обладающий свойством стационарности, называется нестационарным пуассоновским потоком.

Для такого потока число отказов на интервале θ , который начинается в момент t_0 , подчиняется закону Пуассона

$$P_{r,n}(t_0, \theta) = \frac{a^r}{r!} e^{-a}, \quad a = \int_{t_0}^{t_0+\theta} \omega(t) dt,$$

где a - математическое ожидание числа отказов на интервале от t_0 до $(t_0 + \theta)$, величина a зависит не только от величины интервала, но и от положения его на оси t .

4. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ

4.1. Классификация показателей надежности

Показатели надежности служат для количественной характеристики надежности. Классификация показателей надежности приведена в табл. 4.1.

Единичный показатель количественно характеризует только одно свойство. К единичным показателям относятся показатели безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтпригодности. Комплексный показатель количественно характеризует не менее двух свойств надежности.

Показатели надежности могут быть определены различными способами: расчетным, экспериментальным, эксплуатационным и экстраполяционным.

К индивидуальным относятся такие показатели надежности, используя которые можно по результатам испытаний или эксплуатации делать вывод о соответствии конкретного объекта регламентируемым требованиям по надежности.

Показатели, на основе которых можно делать вывод о соответствии требованиям совокупности объектов, называются групповыми.

Нормативными называются показатели, регламентированные в нормативно-технической или конструкторской документации. К оценочным относятся показатели, используемые для сравнительных оценок показателей опытных и серийных объектов.

Структура системы показателей надежности объектов показана на рис. 4.1.

При рассмотрении показателей надежности различают: наименование показателя; численное значение, которое может изменяться в зависимости от условий эксплуатации объекта; формулировку сущности величины показателя, содержащей указания о методах определения его численных значений; размерность показателя.

Таблица 4.1

Классификация показателей надежности

Признак классификации	Вид показателя надежности
Число характеризующих свойств надежности	Единичные Комплексные
Вид характеризующего свойства надежности	Показатель безотказности Показатель долговечности Показатель сохраняемости Показатель ремонтпригодности
Способ определения	Расчетный Экспериментальный Эксплуатационный Экстраполяционный
Область распространения	Индивидуальный Групповой
Область использования	Нормативный Оценочный

4.2. Показатели безотказности объектов

Показатели безотказности рассматриваются отдельно для невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов.

Основными показателями безотказности невосстанавливаемых объектов являются:

- вероятность безотказной работы $P(t)$ на интервале от 0 до t ;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до отказа T_1 ;
- гамма-процентная наработка до отказа T_γ .

Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов определяются через вероятностные характеристики распределений непрерывной случайной величины - наработки до отказа (п. 3.2).

Вероятность безотказной работы - это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникает

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

Интенсивность отказов - условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник

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

Средняя наработка до отказа - математическое ожидание наработки объекта до первого отказа

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

Гамма-процентная наработка до отказа - это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах. Гамма-процентная наработка объекта определяется из уравнения

$$1 - \int_0^{\gamma} f(t) dt = \frac{\gamma}{100}.$$

Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов связаны функциональными зависимостями. Например, вероятность безотказной работы может быть определена при известной интенсивности отказов λ t :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)} = -\frac{d[\ln P(t)]}{dt} \quad (5.1)$$

путем интегрирования

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

В единицах календарного
времени (сроки службы)

➤ Вероятности

Невосстанавливаемые
объекты

В единицах

➤ Средний ресурс

оперативные

➤ Вероятность

экономические

$f(t)$

Восстанавливаемые
объекты

0

mt

t

$\lambda(t)$

t

➤ Вероятность
безотказной работы
➤ Параметр
потока отказов

Основными показателями безотказности восстанавливаемых объектов являются:

- вероятность безотказной работы $P(t_1, t_2)$ на интервале от t_1 до t_2 ;
- параметр потока отказов $\omega(t)$;
- средняя наработка на отказ T_0 .

Показатели безотказности восстанавливаемых объектов определяются через вероятностные характеристики распределений дискретных случайных величин - число отказов в интервале наработки от t_1 до t_2 (п. 3.3).

Начнем с *параметра потока отказов*, представляющего собой отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки. В качестве характеристики потока отказов используется "ведущая функция" $\Omega(t)$ данного потока - математическое ожидание числа отказов за время $\Omega(t) = M[r(t)]$. Параметр потока отказов определяется, как среднее число отказов, ожидаемых в малом интервале времени

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t+\Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t} = \frac{d\Omega(t)}{dt}.$$

Заметим, что ведущая функция

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(t) dt.$$

Вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта для нестационарного пуассоновского потока определяется для интервала от t_1 до t_2 по формуле

$$P(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt}.$$

Средняя наработка на отказ представляет собой отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа отказов в течение этой наработки. Средняя наработка на отказ определяется для интервала от t_1 до t_2 по формуле

$$T_0 = \frac{t_2 - t_1}{\int_0^{t_2} \omega(t) dt}.$$

4.3. Показатели долговечности объектов

К показателям долговечности относятся ресурсы, измеряемые в единицах наработки, и сроки службы, выраженные в единицах календарного времени.

Техническим ресурсом (ресурсом) называется наработка объекта от начала

его эксплуатации или её возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние. К основным ресурсам относятся:

- средний ресурс $T_{P.CP}$;
- гамма-процентный ресурс $T_{P,\gamma}$;
- назначенный ресурс $T_{P.f}$.

Средний ресурс (математическое ожидание ресурса) определяется по формуле

$$T_{P.CP} = \int_0^{\infty} t f(t) dt .$$

Гамма-процентный ресурс представляет собой наработку, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Гамма-процентный ресурс определяется по формуле (рис. 4.2)

$$1 - \int_0^{T_{P,\gamma}} f(t) dt = \frac{\gamma}{100} .$$

Назначенный ресурс - суммарная наработка объекта, при её достижении применение по назначению объекта должно быть прекращено. Целью установления назначенного ресурса является обеспечение принудительного заблаговременного прекращения применения объекта по назначению, исходя из требований безопасности полетов или экономичности эксплуатации объекта. При достижении объектом назначенного ресурса в зависимости от его назначения, особенностей эксплуатации, технического состояния и других факторов объект может быть: списан, направлен в средний или капитальный ремонт, передан для применения не по назначению или может быть принято решение о продолжении эксплуатации.

Сроком службы называется календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или её возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние. К основным срокам службы относятся:

- средний срок службы $T_{\bar{n}\bar{e}.\bar{n}\bar{d}}$;
- гамма-процентный срок службы $T_{\bar{n}\bar{e}.\gamma}$;
- назначенный срок службы $T_{\bar{n}\bar{e}.f}$.

Средний срок службы - математическое ожидание срока службы определяется по формуле

$$T_{\bar{n}\bar{e}.\bar{n}\bar{d}} = \int_0^{\infty} t f_{\bar{n}\bar{e}}(t) dt .$$

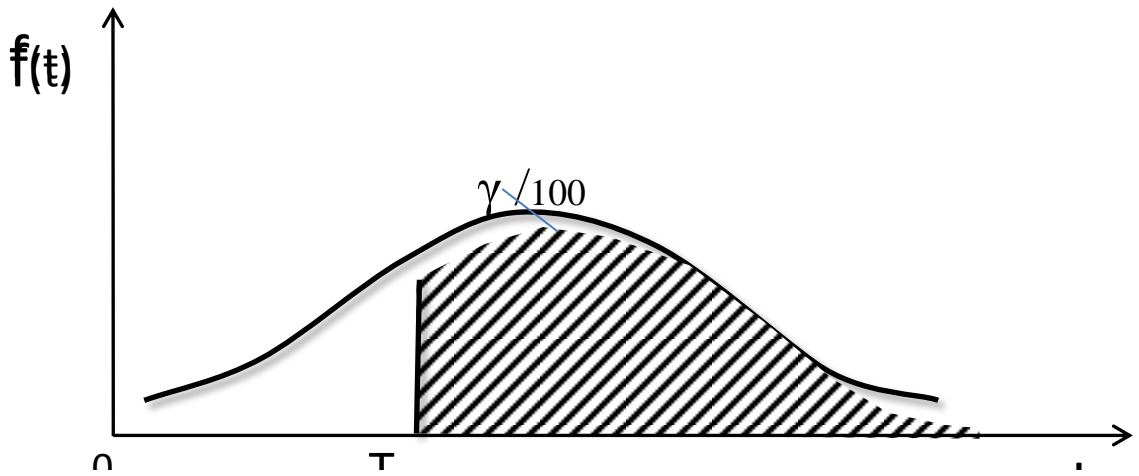


Рис. 4.2. К определению гамма-процентного ресурса

Гамма-процентный срок службы - календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта, в течение которого он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Гамма-процентный срок службы определяется из уравнения

$$1 - \int_0^{\dot{O}_{\tilde{n}e,\gamma}} t f_{\tilde{n}e} t dt = \frac{\gamma}{100}.$$

Назначенный срок службы - это календарная продолжительность эксплуатации объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено.

4.4. Показатели сохраняемости объектов

Показателями сохраняемости являются сроки сохраняемости, определяемые календарной продолжительностью хранения и (или) транспортирования объекта, в течение и после которой сохраняются значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в установленных пределах. К срокам сохраняемости относятся:

- средний срок хранения $\dot{O}_{\tilde{n},\tilde{n}d}$;
- гамма-процентный срок хранения $\dot{O}_{\tilde{n},\gamma}$.

Средний срок хранения - математическое ожидание срока сохраняемости определяется по формуле

$$T_{c.ср.} = \int_0^{\infty} t f_c(t) dt.$$

Гамма-процентный срок хранения - срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженный в процентах, определяется из уравнения

$$1 - \int_0^{T_{c.\gamma}} t f_c(t) dt = \frac{\gamma}{100}.$$

4.5. Показатели ремонтпригодности объектов

Показатели ремонтпригодности связаны с вероятностными характеристиками распределения непрерывной случайной величины - времени восстановления. К основным показателям ремонтпригодности относятся:

- вероятность восстановления работоспособного состояния $P_{\hat{a}}(t)$;
- среднее время восстановления $\hat{O}_{\hat{a}}$.

Вероятность восстановления работоспособного состояния представляет собой вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного. Вероятность восстановления работоспособности определяется по формуле

$$P_{\hat{a}}(t) = P(t_{\hat{a}} \leq t) = \int_0^t f_{\hat{a}}(t) dt.$$

Вид функции распределения $P_{\hat{a}}(t)$ определяется конструктивными особенностями объекта и условиями его восстановления.

Для объектов с преобладанием механических систем в зависимости от вида обслуживания и ремонта характерны следующие виды распределения:

- при выполнении работ по техническому обслуживанию и текущему ремонту сравнительно небольшого объема - распределение Вейбулла;
- при проведении больших объемов работ по ремонту объекта - логарифмически нормальное и нормальное распределение.

При исследовании ремонтпригодности может использоваться интенсивность восстановления, характеризующая вероятность восстановления работоспособности изделия в единицу времени при условии, что до этого момента времени восстановление не произошло. Интенсивность восстановления определяется по формуле.

$$M(t) = \frac{f_{\hat{a}}(t)}{1 - P_{\hat{a}}(t)}.$$

Среднее время восстановления работоспособного состояния представляет собой математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния

$$T_{\sigma, \gamma} = \int_0^{\infty} t f_{\sigma}(t) dt.$$

Аналогично может быть определена средняя трудоемкость восстановления работоспособного состояния объекта.

4.6. Комплексные показатели надежности объектов

Комплексные показатели надежности можно условно разделить на две группы: комплексные технические показатели и комплексные экономические показатели.

К комплексным техническим показателям относятся:

- коэффициент готовности - K_G ;
- коэффициент оперативной готовности - $K_{i\bar{A}}$;
- коэффициент технического использования - $K_{ТИ}$;
- коэффициент планирования применения - $K_{пл.пр.}$;
- коэффициент сохранения эффективности - $K_{с.эф.}$.

Коэффициент готовности - вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусмотрено.

Нестационарный средний коэффициент готовности определяется по формуле

$$\hat{E}_{\bar{A}}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t K(x) dx.$$

Стационарный коэффициент готовности

$$\hat{E}_{\bar{A}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{E}_{\bar{A}}(t).$$

Коэффициент оперативной готовности представляет собой 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.

В стационарном случае коэффициент оперативной готовности определяется по формуле

$$K_{i\bar{A}} = \hat{E}_{\bar{A}} D(t).$$

Коэффициент технического использования - отношение математического ожидания интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, простоев, обусловленных ТОиР

$$\hat{E}_{\partial E} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N t_{i\partial i} + \sum_{i=1}^N t_{i\partial}}$$

где $\sum_{i=1}^N t_i$, $\sum_{i=1}^N t_{i\partial i}$, $\sum_{i=1}^N t_{i\partial}$ - интервалы времени работы, ТОиР соответственно.

Коэффициент планируемого применения - доля периода эксплуатации, в течение которой объект не должен находиться на плановом ТОиР

$$K_{пл.пр} = 1 - \frac{M(T_{пл.пр})}{T_э}$$

где $T_э$ – интервал времени эксплуатации;

$M T_{пл.пр}$ – математическое ожидание суммы продолжительностей ТОиР, планируемых для интервала времени эксплуатации.

Коэффициент сохранения эффективности - отношение показателя эффективности за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказа объекта в течение того же периода эксплуатации не возникает

$$K_{сэ} = \frac{\mathcal{E}_р}{\mathcal{E}_н}$$

где $\mathcal{E}_р, \mathcal{E}_н$ – реальное и номинальное значения показателя эффективности соответственно.

К комплексным экономическим показателям надежности относятся:

- средняя суммарная продолжительность (трудоемкость, стоимость) ТОиР

$$T_{ср.ТОиР}(\tau_{ср.ТОиР}, C_{ср.ТОиР});$$

- удельная суммарная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технического обслуживания и ремонта $T_{уд.ТОиР}(\tau_{уд.ТОиР}, C_{уд.ТОиР})$.

Средняя суммарная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технического обслуживания и ремонта - математическое ожидание суммарной продолжительности (трудоемкости, стоимости) технического обслуживания и ремонта за определенный период эксплуатации.

Удельная суммарная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технического обслуживания и ремонта - отношение средней суммарной продолжительности (трудоемкости, стоимости) технического обслуживания и ремонта к математическому ожиданию суммарной наработки объекта за определенный период эксплуатации.

5. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПО ДАННЫМ ИСПЫТАНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

5.1. Виды испытаний на надежность

Испытания - экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результат воздействия на него при его функционировании, при моделировании объекта.

Данные испытаний - регистрируемые при испытаниях значения характеристик свойств объекта и условий испытаний, наработок, а также других параметров, являющихся исходными данными для последующей обработки.

Результатом испытаний является оценка характеристик свойств объекта, установления соответствия объекта заданным требованиям по данным испытаний, результаты оценки качества функционирования объекта в процессе испытаний. Систематизация видов испытаний по основным признакам приведена в табл. 5.1.

Одним из видов испытаний можно считать *наблюдения в условиях эксплуатации (эксплуатационные наблюдения)*, которые представляют собой процесс, обеспечивающий получение достоверной информации о надежности наблюдаемых объектов.

Таблица 5.1

Классификация видов испытаний

Признак вида испытаний	Вид испытаний
1	2
Назначение испытаний	Исследовательские Контрольные Сравнительные Определительные
Уровень проведения испытаний	Государственные Межведомственные Ведомственные
Этапы разработки продукции	Доводочные Предварительные Приемочные
Условия и место проведения	Лабораторные Стендовые Полунатурные Натурные Испытания с использованием моделей Эксплуатационные

1	2
Продолжительность испытаний	Нормальные Ускоренные Сокращенные
Виды воздействия	Механические Климатические Термические Радиационные Электрические Электромагнитные Магнитные Химические Биологические
Результат воздействия	Неразрушающие Разрушающие Испытания на стойкость Испытания на прочность Испытания на устойчивость
Определяемые характеристики	Испытания на надежность Испытания на безопасность Испытания на транспортабельность Граничные испытания Технологические испытания

5.2. Планирование испытаний и эксплуатационных наблюдений

При планировании испытаний и эксплуатационных наблюдений используются аналогичные понятия, термины и определения, в общем случае вместо двух терминов будем использовать один обобщающий - наблюдения.

План наблюдений устанавливает число объектов наблюдения, порядок проведения наблюдений и критерии их прекращения.

Для рассмотрения планов наблюдений введем обозначения. План наблюдений представляется в виде шифра, имеющего три составляющие.

Первая составляющая N означает число объектов наблюдения.

Вторая составляющая указывает степень и характер восстановления объектов: U - невозстанавливаемые и незаменимые объекты при наблюдениях в случае отказа; R - восстанавливаемые, но заменяемые объекты при наблюдениях в случае отказа; M - восстанавливаемые при наблюдениях в случае отказа.

Третья составляющая содержит критерии прекращения наблюдений:

T - время или наработка, при истечении которых каждым объектом прекращаются наблюдения;

r - число отказавших объектов, при достижении которого прекращаются наблюдения;

(r, T) - число отказавших объектов или время (наработка), при достижении одного из которых прекращаются наблюдения;

T_{Σ} - суммарное время (наработка) всех объектов, при истечении которого прекращаются наблюдения;

(r, T_{Σ}) - число отказавших объектов или суммарное время (наработка), при достижении одного из которых прекращаются наблюдения.

В качестве примера рассмотрим план наблюдений [NUT], согласно которому одновременно ведутся наблюдения за эксплуатацией N объектов, отказавшие во время наблюдений объекты не восстанавливаются и не заменяют (U), наблюдения прекращают при истечении времени наблюдений или наработки T для каждого не отказавшего объекта.

Планы наблюдений могут быть сгруппированы по признаку критерия прекращения наблюдений и представлены в графическом виде (рис. 5.1).

При планировании наблюдений производится выбор (определение) элементов системы наблюдений: объектов наблюдения, плана наблюдений (рис. 5.3), условий эксплуатации, режимов работы, места проведения наблюдений и объемов наблюдений.

Состав объема наблюдений зависит от принятого плана наблюдений:

Число объектов наблюдения N и число отказов наблюдаемых объектов r (для планов [NUr], [NRr], [NMr]).

Число объектов наблюдения и продолжительность наблюдения T (для планов [NUT], [NRT], [NMT]).

5.3. Характеристика исходной информации о надежности объектов

Необходимую информацию за определенный период времени о налете (наработке) объекта, об отказах и повреждениях, о доработках объектов, об условиях эксплуатации можно получить в предприятиях и организациях гражданской авиации и авиационной промышленности. В качестве источников информации о надежности используется эксплуатационная документация: формуляры и паспорта объектов, учетные и отчетные документы, журналы учета отказов и неисправностей, рекламационные и технические акты, бортовые журналы, карты-наряды, ведомости дефектации и документы по испытаниям.

В ряде АТБ, осуществляющих сбор информации о надежности авиационной техники и оснащенных ЭВМ, информация хранится на магнитных носителях.

Основными требованиями, предъявляемыми к исходной информации, являются достоверность, полнота и оперативность.

Достоверность заключается в обеспечении объективности всех данных и достигается точным учетом всех отказов и повреждений, причин их возникновения, последствий и времени восстановления.

Полнота информации заключается в том, чтобы получаемая информация, как по числу объектов наблюдения, так и по объему сведений об условиях работы, причинах отказов, способах восстановления, наработке была достаточна для решения поставленных задач. В то же время объем сведений должен быть согласован с их дальнейшим использованием, в них не должно быть ничего лишнего. Чем больше число объектов наблюдений и длительность наблюдения, тем более широкий круг задач может быть рассмотрен. Задача определения закона распределения наработки до отказа требует больше статистической информации, например, чем определение показателей безотказности.

Оперативность информации необходима для скорейшего принятия мер по воздействию на процессы разработки, изготовления и эксплуатации объектов.

Информацию, полученную при эксплуатации объектов, можно рассматривать как обратную связь в системе регулирования надежности.

Что касается объема и характера статистических материалов, то на практике, в большинстве случаев, нет возможности так организовать эксплуатационные наблюдения, чтобы получить данные по надежности необходимого вида и в достаточном объеме, обычно задача заключается в том, чтобы оценить показатели надежности по тому статистическому материалу, который имеется.

Рассматривая особенности имеющейся эксплуатационной информации, следует отметить, что она не соответствует в полной мере ни одному из стандартных планов наблюдений (п. 5.2).

Реальный план наблюдений, соответствующий имеющимся эксплуатационным данным, характеризуется следующим:

- переменным числом испытываемых объектов, наблюдаемых на разных интервалах наработки в фиксированные моменты календарного времени (переменность парка);
- ограничением наработки объекта техническим ресурсом (до ремонта, межремонтным), приводящим к усеченности выборки;
- неодновременным началом и окончанием испытаний отдельных экземпляров объектов.

Такой план имеет некоторые общие черты со стандартными планами [NRT] и [NMT], согласно которым имеется N объектов наблюдения; отказавшие объекты заменяются (R) или восстанавливаются (M), испытания прекращают при наработке T каждого не отказавшего объекта.

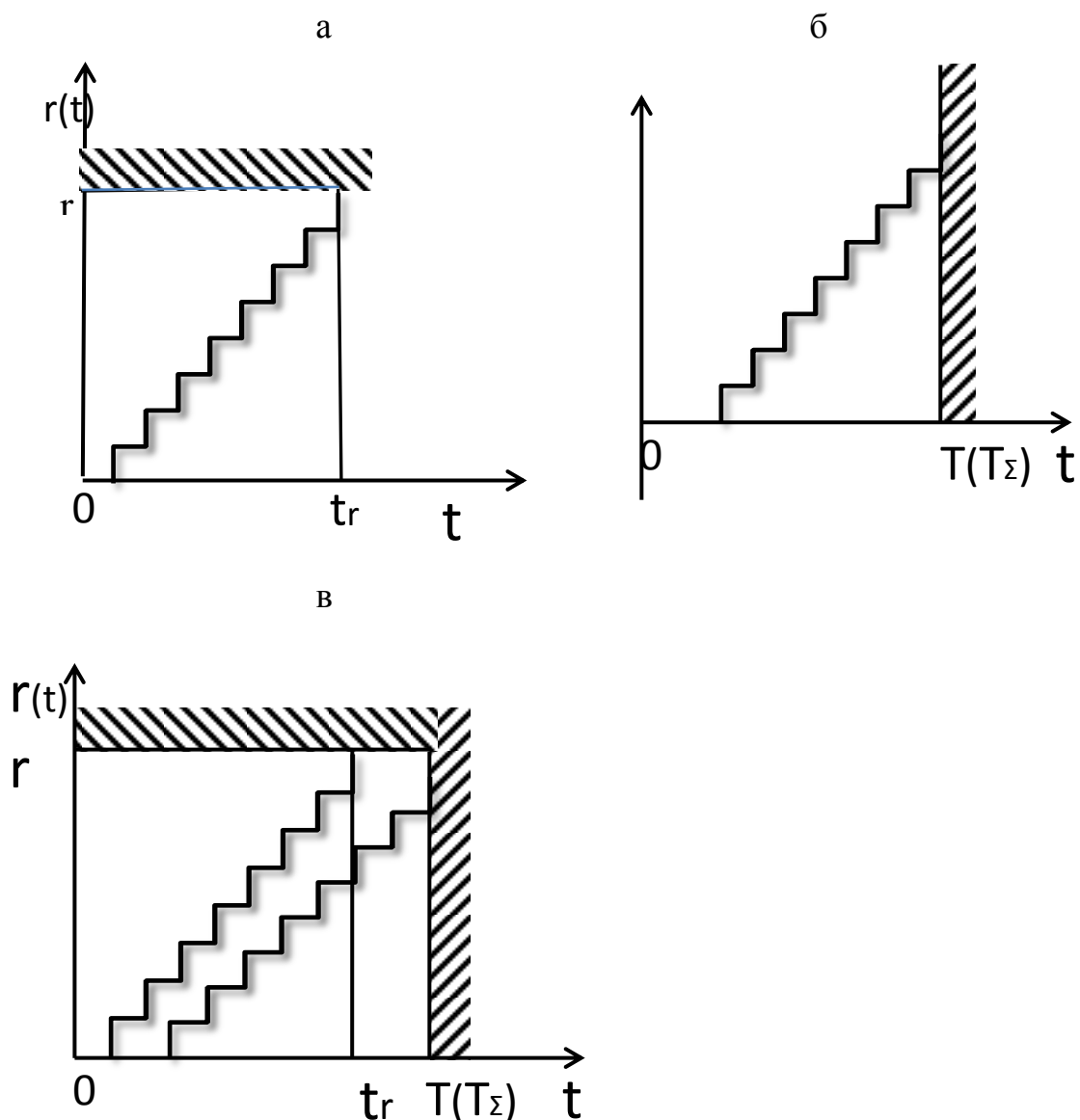


Рис. 5.1. Планы испытаний (эксплуатационных наблюдений):
 а - $[NUr]$, $[NRr]$, $[NM_r]$; б - $[NUT]$, $[NRT]$, $[NMT]$; в - $[NU(r,T)]$, $[NR(r,T)]$,
 $[NM(r,T)]$

Имеющаяся эксплуатационная информация по надежности содержит два типа случайных величин (реализаций) наработки объектов, составляющих выборку:

- 1) реализации, представляющие собой случайные величины наработок до отказа (между отказами). Назовем их "полными" реализациями;
- 2) реализации, представляющие собой величины безотказных наработок объектов. Это весьма распространенный вид экспериментальных данных, соответствующих случаю, когда испытания (наблюдения) прекращены или объект снят с испытаний до наступления отказа. Назовем их "неполными" реализациями.

В первом случае используется полная выборка и применимы стандартные планы наблюдений.

Во втором случае имеет место *цензурирование* - событие, приводящее к прекращению эксплуатационных наблюдений объекта до наступления отказа (предельного состояния).

При формировании выборки объектов обоих видов реализаций образуется *цензурированная выборка*, элементами которой являются значения наработок до отказа (полные реализации) и наработок до цензурирования (неполные реализации).

Различаются однократно и многократно цензурированные выборки. В *однократно цензурированной выборке* значения всех наработок до цензурирования равны между собой и не меньше наибольшей наработки до отказа. *Многократно цензурированная выборка* характеризуется значениями наработок до цензурирования, не равными между собой.

Учитывая особенности данных эксплуатационных наблюдений, целесообразно представить цензурированную выборку в форме временных диаграмм (рис. 5.2-5.4).

В качестве примера приведена выборка из $N_c = 7$ самолетов с двумя изделиями одного типа. Для уточнения информации, полученной в период наблюдения (T_0, T_k) , может использоваться дополнительная информация о наработке изделий до начала интервала наблюдения T_0 (при цензурировании слева).

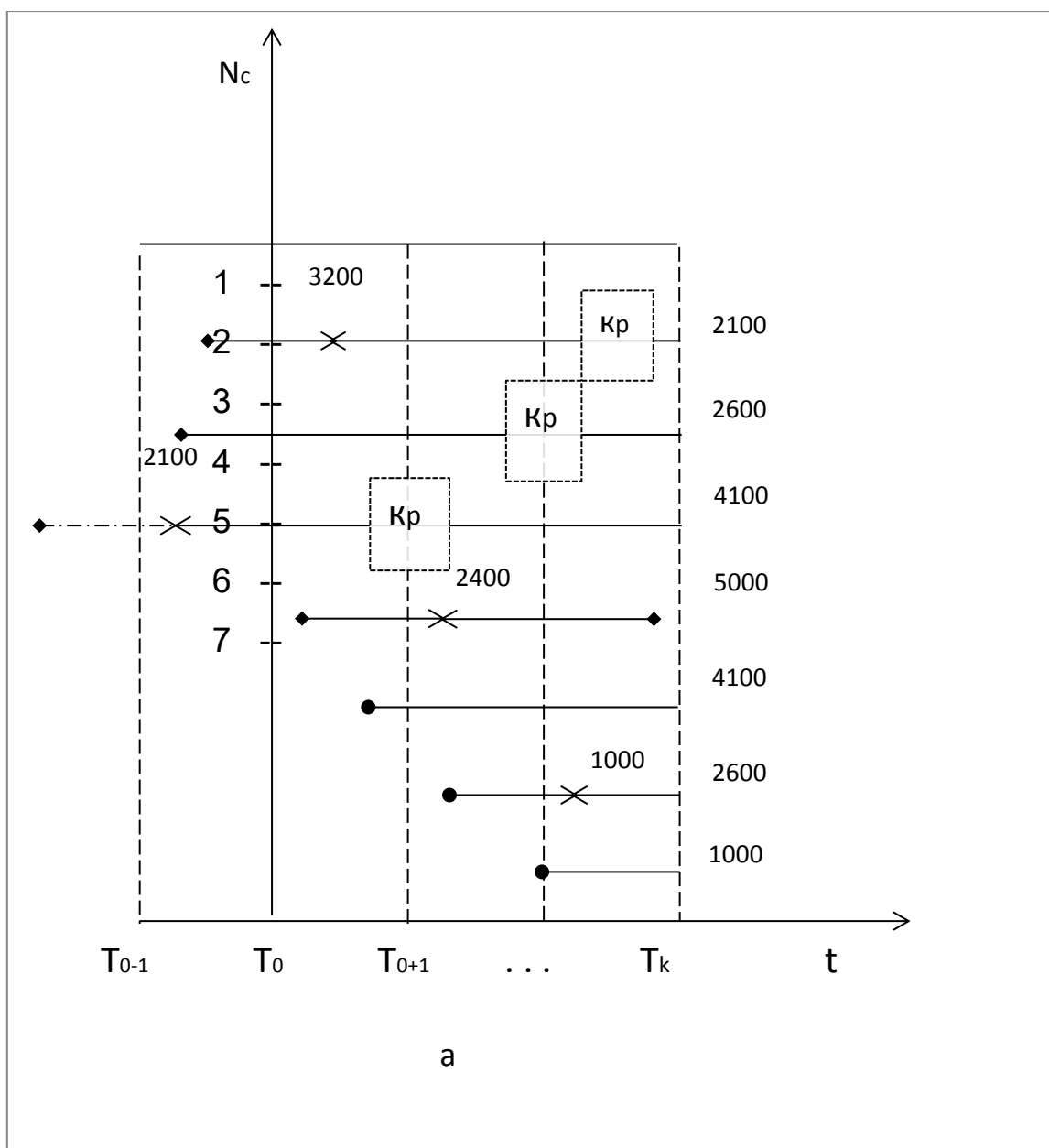


Рис. 5.2. Временная диаграмма наработки переменного парка самолетов и отказов однотипных объектов:

- — начало наблюдения для вновь изготовленного ЛА;
- ◆ — начало наблюдения после выхода ЛА из капитального ремонта;
- ◆ — окончание наблюдения, ✕ - отказ объекта

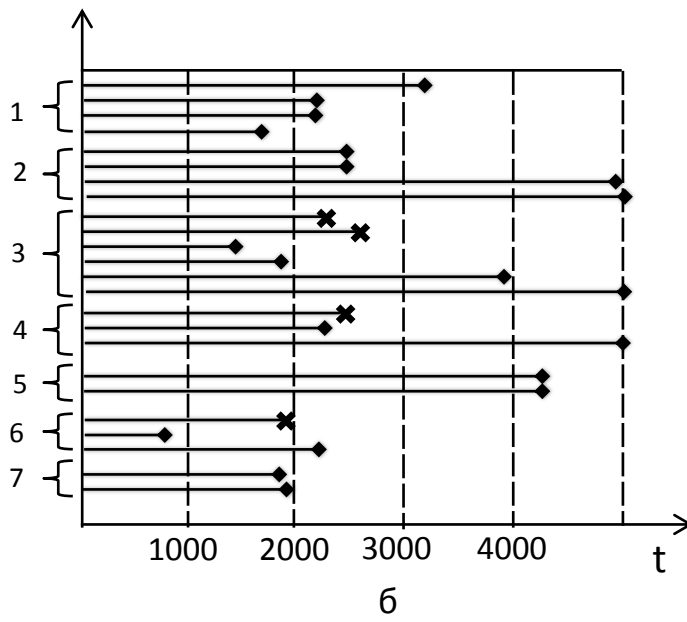


Рис. 5.3. Временная диаграмма наработок до отказа и цензурирования однотипных объектов

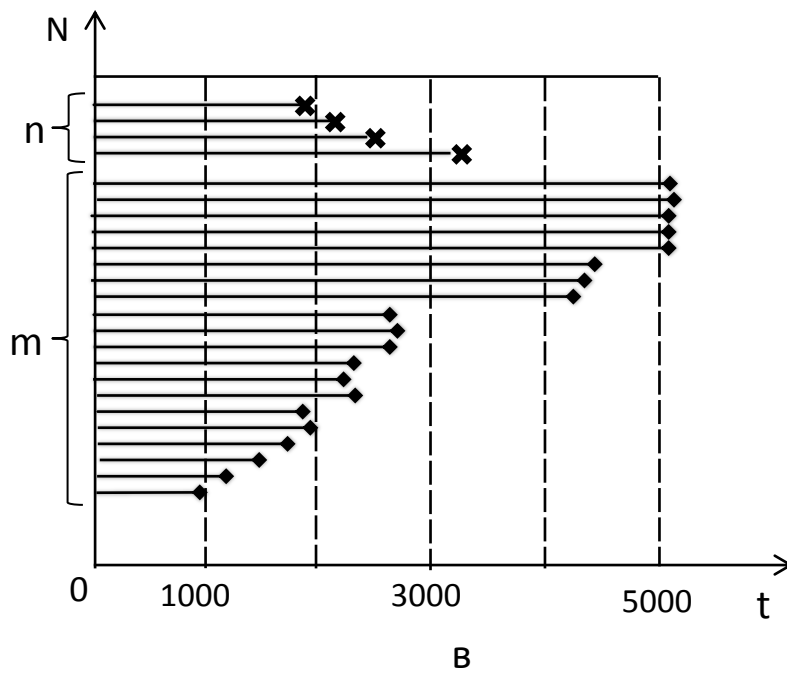


Рис. 5.4. Ранжированная диаграмма наработок до отказа: $\tau_i, i = \overline{1, n}$ и до цензурирования $t_j, j = \overline{1, m}, N = n + m$

5.4. Классификация методов оценки показателей надежности объектов

Принята следующая классификация методов оценки показателей надежности (рис. 5.5).

Непараметрический метод оценки показателей надежности предусматривает при неизвестном законе распределения наработки до отказа (ресурса, срока службы, срока сохраняемости, времени восстановления) выполнение непосредственной оценки показателей надежности по данным эксплуатационных наблюдений (испытаний).



Рис. 5.5. Методы оценки показателей надежности объектов

Параметрический метод предусматривает при известном законе распределения наработки до отказа и других случайных величин выполнение следующих операций: оценку параметров закона распределения, входящих в расчетную формулу определенного показателя надежности, и оценку показателей надежности по вычисленным оценкам параметров закона распределения. При неизвестном законе распределения определяется сначала закон распределения.

5.5. Оценка показателей надежности параметрическим методом

Задача оценки показателей надежности параметрическим методом заключается в следующем. По данным наблюдений известны наработки n однотипных объектов $t_{n+1}, t_{n+2}, \dots, t_N$ (неполные реализации), т.е. для $N - n$ объектов известно, что их наработка до отказа будет больше некоторого

значения θ , выражающего заданную длительность эксплуатации. Данная совокупность статистических данных характеризуется переменностью парка объектов в различных интервалах наработки и усеченностью выборки.

Задача заключается в том, чтобы определить вид функции (закона) распределения наработки до отказа, оценить параметры распределения и показатели надежности объекта.

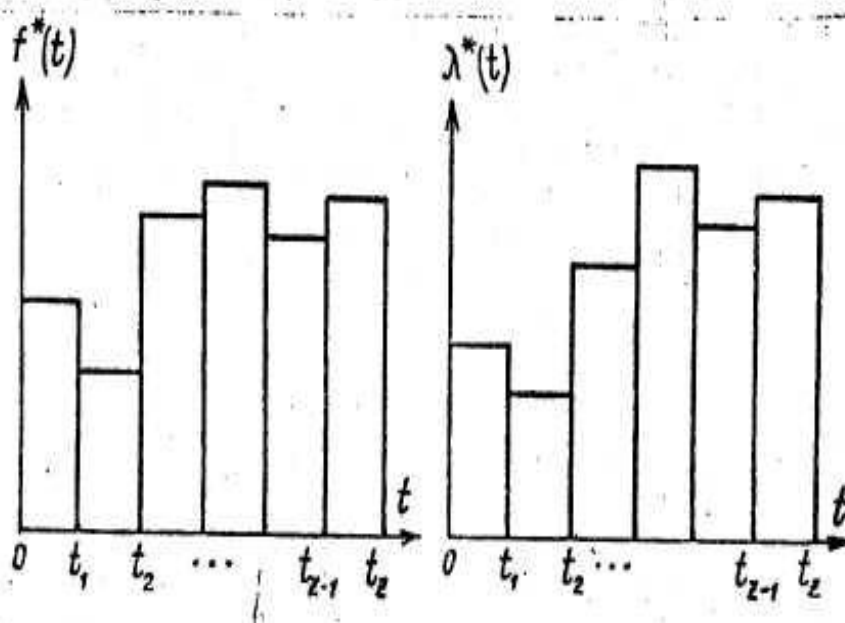


Рис. 5.6. Гистограммы статистических оценок $f^*(t)$, $\lambda^*(t)$

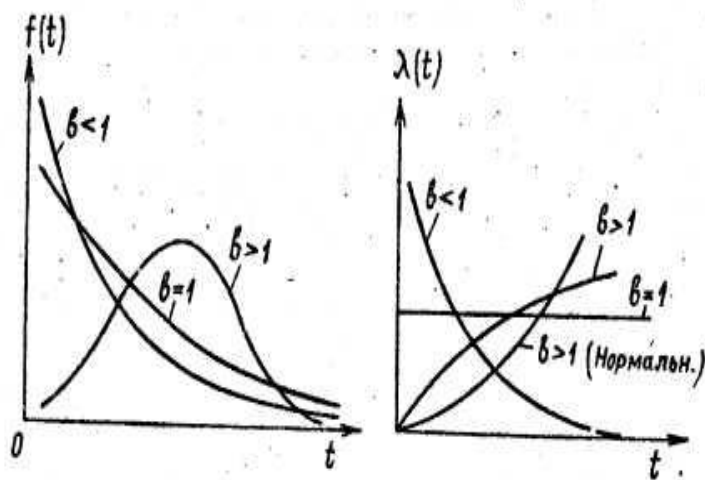


Рис 5.7. Теоритические зависимости $f(t)$ и $\lambda(t)$ для различных законов распределения: экспоненциального ($b=1$), нормального ($b > 1$), Вейбулла ($b < 1, b = 1, b > 1$)

Рекомендуется следующий порядок решения задачи:

- 1) построение временной диаграммы;
- 2) построение вариационного ряда;

- 3) построение гистограммы плотности вероятности наработки до отказа $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$;
- 4) принятие гипотезы о законе распределения наработки до отказа;
- 5) оценка параметров закона распределения наработки до отказа;
- 6) проверка гипотезы о законе распределения наработки до отказа;
- 7) оценка показателей надежности.

Временная диаграмма – образуется в результате нанесения моментов отказов однотипных изделий на графическую модель, содержащую информацию о налете самолетов (рис. 5.4 б).

В качестве аналога вариационного ряда рекомендуется использовать ранжированную временную диаграмму, в которой реализации расположены в следующем порядке: сначала полные в порядке возрастания, затем неполные в порядке убывания (рис. 5.4 а).

Гистограммы плотности распределения $f^*(t)$ и интенсивности отказов $\lambda^*(t)$ строятся следующим образом:

- проводятся два крайних сечения ранжированной диаграммы: первое – через точку окончания наименьшей из полных реализаций; второе – через точку, соответствующую окончанию наибольшей из полных реализаций;
- расстояние между крайними сечениями, определяющее размах V , разбивается на Z интервалов, и проводятся сечения диаграммы, соответствующие границам интервалов;
- вычисляются значения $f^*(t)$ и $\lambda^*(t)$ для каждого интервала по формулам:

$$f_i^* t = \frac{\Delta n_i}{N_i \Delta t_i}, \quad (5.2)$$

$$\lambda_i^* t = \frac{\Delta n_i}{[N_i - n_i(t)] \Delta t_i},$$

где Δn_i – число отказавших объектов в интервале Δt_i ;

$n_i t$ – число отказавших объектов до начала i – го интервала;

Δn_i – число изделий, наблюдаемых в интервале Δt_i .

По ранжированной диаграмме определяются, исходные данные для расчета $f^*(t)$, $\lambda^*(t)$ (рис. 5.4 в):

Δn_i – число полных реализаций, оканчивающихся в i -м интервале;

$n_i(t)$ – число полных реализаций, окончившихся до начала i -го интервала;

N_i – общее число реализаций диаграммы за исключением неполных реализаций, окончившихся до начала i -го интервала.

Результаты расчетов по (5.2) представляются в виде гистограмм $f^*(t)$, $\lambda^*(t)$ (рис. 5.6).

Принятие гипотезы о законе распределения наработки до отказа основано на анализе физики отказов (см. п. 2) и сравнительном анализе гистограмм $f^*(t), \lambda^*(t)$ с теоретическими кривыми $f(t), \lambda(t)$ для различных законов распределения (рис. 5.7).

После принятия гипотезы определяются параметры выбранного теоретического закона распределения отдельно для однократно и многократно цензурированных выборок.

Оценка параметров распределения для однократно цензурированной выборки выполняется методом наибольшего правдоподобия.

Для случая усеченной выборки при экспоненциальном законе распределения наработки до отказа

$$f(\theta) = \lambda \cdot e^{-\lambda t_i} = \frac{1}{T} e^{-\frac{t_i}{T}},$$

где T – средняя наработка до отказа;

θ – установленная продолжительность наблюдений.

Функция правдоподобия

$$L' = \sum \ln\left(\frac{1}{T} e^{-\frac{t_i}{T}}\right) - (N - n) \frac{\theta}{T}.$$

Отсюда находим параметр экспоненциального закона распределения T

$$\frac{\partial L_{\theta}}{\partial T} = \frac{n}{T} + \frac{1}{T^2} \sum_{i=1}^n t_i + \frac{N - n}{T^2} \theta = 0.$$

Тогда

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i + \frac{N - n}{T^2} \theta,$$

где n – число отказавших объектов.

Для случая усеченной выборки числа объектов n при распределении Вейбулла параметры распределения a и b могут быть определены путем решения системы уравнений графически (рис. 5.8)

$$\begin{aligned} \varphi_1 = a &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^b + \frac{N - n}{T^2} \theta^b, \\ \varphi_2 = a &= \frac{\sum_{i=1}^n t_i^b \ln t_i + (N - n) \theta^b \ln \theta}{\frac{n}{b} \sum_{i=1}^n \ln t_i}, \end{aligned}$$

Для случая усеченной выборки при распределении наработки до отказа по усеченному нормальному распределению параметры m_t и σ_t определяются путем совместного решения уравнений:

$$Y_1 = \frac{\bar{T}_2 - T_1^2}{\theta - T_1^2}, \quad Y_2 = \frac{1 + CK\varphi(K - [C\varphi(K)]^2)}{(C\varphi(K) - K)^2}, \quad (5.3)$$

где $\bar{T}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$, $\bar{T}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i)^2$.

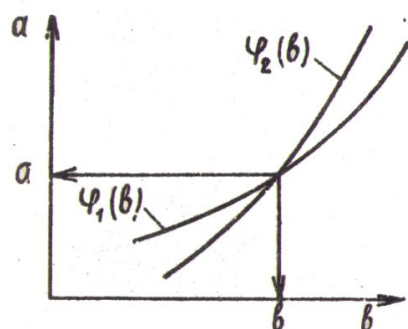


Рис.5.8. Определение параметров распределения Вейбулла

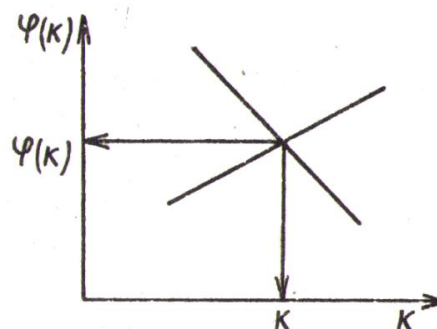


Рис.5.9. Определение значений $\varphi(K)$ и K для нормального закона распределения

Определяется $K_{нач}$ по табл. приложения 1 [9] по значениям $F_0(K_{нач})$, полученного из выражения:

$$F_0(K_{нач}) = 1 - \frac{1}{\sum_{i=1}^z \frac{N_i}{nZ}}$$

Величина C определяется по формуле:

$$C = \sum_{i=1}^z \frac{N_i - n}{nZ}$$

Из выражения (5.3) определяется $\varphi^p(K) = f(K)$. Задавая K , близкое к $K_{нач}$, строят графики (рис. 5.9)

$$\varphi^p(K) = f(K), \quad \varphi^r(K) = \frac{f_0(K)}{F_0(K)},$$

где $f_0(K)$ и $F_0(K)$ определяются по табл. приложения 1, 2 [6].

По графику (рис. 5.9) определяются $\varphi(K)$ и K и находятся параметры распределения m_i и σ_i из выражения:

$$\sigma_i = \frac{\theta - \bar{T}_1}{C\varphi(K) - K}, \quad m_i = K\sigma_i + \theta.$$

Для многократно цензурированной выборки вычисляют точечные оценки параметров распределения методом максимального правдоподобия только в случае представительности выборки объектов N и их отказов n

$$6 \leq N \leq 10, \quad \frac{n}{N} \geq 0,5$$

$$10 \leq N \leq 20, \quad \frac{n}{N} \geq 0,3$$

$$\begin{aligned} 20 \leq N \leq 50, & \quad \frac{n}{N} \geq 0,2 \\ 50 \leq N \leq 100, & \quad \frac{n}{N} \geq 0,1 \\ 100 \leq N \leq 400, & \quad \frac{n}{N} \geq 0,05. \end{aligned}$$

В других случаях необходимо вычислять только нижние доверительные границы.

Точечную оценку параметра экспоненциального распределения вычисляют по формуле

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \tau_i + \sum_{j=1}^m t_j}.$$

Точечная оценка параметров распределения Вейбулла a и b находится из уравнений

$$\begin{aligned} \left(\frac{n}{b} + \sum_{i=1}^n \ln \tau_i\right) \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^b + \sum_{j=1}^m t_j^b\right) - n \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^b \ln \tau_i + \sum_{j=1}^m t_j^b \ln t_j\right) &= 0, \\ a &= \left(\frac{\sum_{i=1}^n \tau_i^b + \sum_{j=1}^m t_j^b}{n} \right)^{\frac{1}{b}}. \end{aligned}$$

Порядок вычисления оценок a и b "вручную" при помощи табличных коэффициентов A_i , C_i , P и L приведен в ГОСТ 27.504. Программа вычисления параметров a и b с применением метода Ньютона-Рафсона решения уравнений правдоподобия приведена в ГОСТ 27.504.

Точечные оценки параметров нормального распределения m_t и σ_t вычисляются по уравнениям:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i - m_t}{\sigma_t} + \sum_{j=1}^m \frac{f\left(\frac{m_t - t_j}{\sigma_t}\right)}{\Phi\left(\frac{m_t - t_j}{\sigma_t}\right)} &= 0, \\ n - \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_i - m_t}{\sigma_t}\right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{m_t - t_j}{\sigma_t}\right) \frac{f\left(\frac{m_t - t_j}{\sigma_t}\right)}{\Phi\left(\frac{m_t - t_j}{\sigma_t}\right)} &= 0. \end{aligned}$$

Метод ручного расчета приведен в [6].

Проверка гипотезы о законе распределения для однократно цензурированной выборки может выполняться по критерию Пирсона χ^2 .

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^z \frac{(\Delta n_i + NP_i)^2}{NP_i},$$

где Z – число интервалов группировки;

Δn_i – число наблюдаемых статистических данных, попавших в i -й интервал;

NP_i – число данных, попавших в i -й интервал при условии, что гипотеза о законе распределения верна.

Большое значение χ^2 указывает на расхождение между гипотезой и наблюдаемыми статистическими данными. Поэтому критической областью является интервал $\chi^2_{1-0.01\alpha, \infty}$, где α принятый уровень значимости в %. Уровень значимости – это выраженная в процентах максимально допустимая вероятность неправильного отклонения гипотезы. Значения квантилей распределения табулированы [5,6]. Если полученное значение χ^2 удовлетворяет условию $0 < \chi^2 < \chi^2_{1-0.01\alpha, \infty}$, то гипотеза принимается. В противном случае гипотеза отвергается.

Проверка гипотезы о законе распределения для многократно цензурированной выборки проводится в следующем порядке.

Исходный вариационный ряд заменяют преобразованным рядом, полученным заменой каждого члена τ_i и $t_j (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m})$ в исходном ряду членов вида

$$\chi_{i,j} = F(\tau_i, t_j, \Omega_1, \Omega_2),$$

где Ω_1, Ω_2 – параметры распределения.

Для каждого интервала наблюдения l вычисляют величины

$$Z_1^l = \frac{\varkappa V_l + \varkappa V_{l+1}}{2},$$

$$Z_2^l = \frac{\varkappa V_l + \varkappa V_{l+1}}{2}.$$

Если $V_l = 0$, то принимают $Z_1^l = 0$, если $V_l = N$, то $Z_l^L = \varkappa_N$.

Вычисляют величину $T_{N,L,n}$

$$T_{N,L,n} = \sum_{l=1}^L \left\{ \frac{1}{n_l(Z_2^l - Z_1^l)} \left[\sum_{i=V_{l+1}}^{V_l} \varkappa_i - n_l Z_1^l \right] \right\},$$

где $\varkappa_0 = 0$.

Вычисляют величину Z :

$$Z = \left| \frac{T_{N,L,n} - \frac{n}{2}}{\sqrt{12n}} \right|.$$

Гипотезу о согласии выбранного вида распределения наработки до отказа с опытными цензурированными данными на уровне значимости α отвергают, если полученная величина Z больше U_β , где U_β – квантиль нормального распределения, соответствующий доверительной вероятности $\beta = 1 - \frac{\alpha}{2}$.

5.6. Оценка показателей надежности непараметрическим методом

Непараметрический метод применяется при неизвестном виде закона распределения наработки до отказа и предусматривает непосредственную оценку показателей надежности по выборочным данным.

Учитывая особенности данных эксплуатационных наблюдений, целесообразно рассмотреть отдельно оценку показателей надежности непараметрическим методом по полным данным и цензурированным выборкам.

Задача оценки показателей надежности по полным данным формулируется следующим образом.

Если под наблюдением находятся N однотипных объектов с неизвестной, но одинаковой вероятностью отказа $q(t)$, то за фиксированную наработку T число отказавших объектов r является случайной величиной, имеющей биномиальное распределение

$$P_{r \leq n} = \sum_{k=0}^r C_N^k \cdot q^k (1-q)^{N-k}. \quad (5.4)$$

Требуется выполнить оценку вероятности безотказной работы $P = 1-q$. Оценка вероятности отказа q может быть получена методом максимального правдоподобия. Функции правдоподобия, полученные из (5.4), зависят от значений N и n .

$$L(q) = C_N^n \cdot q^n \cdot (1-q)^{N-n}.$$

В интервале $0 \leq q \leq 1$ при любом виде функции $L(q)$ имеет максимум.

Для упрощения операции дифференцирования функцию правдоподобия сначала логарифмируют

$$\lg L = \lg C_N^n + n \lg q + (N-n) \lg(1-q).$$

Затем дифференцируют

$$\frac{\partial \lg L}{\partial q} = \frac{n}{q} - \frac{N-n}{1-q}.$$

Тогда уравнение для отклонения q имеет вид

$$\frac{n}{q} = \frac{N-n}{1-q}.$$

Откуда находим точечную оценку для вероятности отказа при наработке

T

$$q = \frac{n}{N}. \quad (5.5)$$

Точечная оценка вероятности безотказной работы при наработке T

$$P = 1 - \frac{n}{N}. \quad (5.6)$$

Однако точечные оценки имеют определенные недостатки. Если при испытаниях отказы не наблюдались ($n=0$) или все N испытаний оказались неудачными ($N = n$), то точечные оценки будут соответственно $q=0$ и $q=1$, что практически нереально.

Ограниченность точечной оценки проявляется и на следующем примере. Пусть проведено два независимых испытания одних и тех же объектов. В одном случае при наработке $T = 1000$ ч из 20 объектов отказало 2, в другом при той же наработке из 100 объектов зафиксировано 10 отказов. Интуитивно ясно, что оценка во втором случае заслуживает большего доверия, так как основывается на информации большего объема. Однако точечная оценка не отражает этого и в обоих случаях вероятность отказа за 1000 ч по результатам испытаний будет одинаковой $q=0,1$.

Любая точечная оценка, если даже она удовлетворяет всем критериям качества, обладает существенным недостатком, представляя собой лишь частное значение случайной величины. Поэтому кроме точечной оценки желательно знать "надежные" границы, так называемый доверительный интервал оценки.

Задача заключается в том, чтобы по выборочным характеристикам случайной величины q^* определить нижнюю q_H и верхнюю q_B доверительные границы генеральной характеристики. Эти границы и определяют доверительный интервал, который с некоторой доверительной вероятностью накрывает q (рис. 5.10)

Введем коэффициенты R_0, R_1, R_2 , по которым доверительные границы для вероятности q вычисляются по следующим формулам:

$$\text{при } n = 0, q_H = 0, q_B = \frac{R_0}{N},$$

$$\text{при } n \neq 0, q_H = \frac{n}{N \cdot R_1}, q_B = \frac{n}{N \cdot R_2}.$$

Коэффициенты R_0, R_1, R_2 вычисляются по формулам:

$$R_0 = N[1 - \sqrt[N]{1 - \alpha}],$$

$$R_1 = \frac{n(2N - n + \frac{1}{2} X_{1-\alpha})}{N - X_{1-\alpha}},$$

$$R_2 = \frac{n(2N - n + \frac{1}{2} X_{\alpha})}{N \cdot X_{\alpha}},$$

где X_α - квантиль распределения X^2 с $\hat{E} = 2(n+1)$ степенями свободы, а $X_{1-\alpha}$ - квантиль того же распределения с $K = 2n$ степенями свободы.

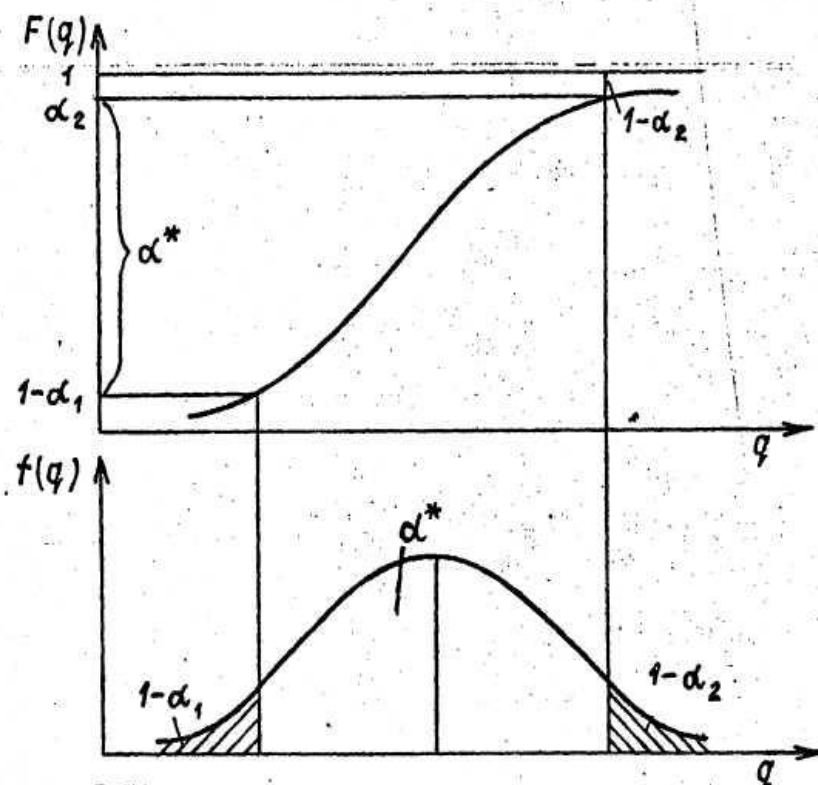


Рис. 5.10. Определение доверительных границ

Оценка доверительных границ вероятности безотказной работы определяется следующим образом

$$P_H = 1 - q_B, P_B = 1 - q_H.$$

Примеры решения задач по оценке показателей надежности приведены в [6]. Оценки, определяемые выражениями (5.5, 5.6), являются эффективными и несмещенными.

Формулы для точечной оценки показателей надежности непараметрическим методом при разных планах наблюдений приведены в табл. 2.3. Оценки получены методом максимального правдоподобия.

В табл. 5.2 приняты следующие обозначения:

NUN - план наблюдений за N объектами, отказавшие объекты не заменяются, наблюдения ведутся до отказа всех N объектов;

N - число наблюдаемых объектов;

$$m = \begin{cases} r & \text{äëü î ëàí î â} \quad [NUR], [NRr] \\ d & \text{äëü î ëàí î â} \quad [NUT], [NRT] \end{cases};$$

r - число отказов, до появления которых проводятся наблюдения;

d - число отказов за время наблюдения;

$n(t)_{(i)}$ - число членов вариационного ряда, предшествующих t_i ;

t_i - число реализаций случайной величины (наработки до отказа, ресурса, срока службы, срока хранения, времени восстановления);

Δt_i - интервал времени значения случайной величины;

$t_{(i)}$ - значения случайной величины в вариационном ряду

$$t_{(i)} t_{(1)} \leq t_{(2)} \leq \dots \leq t_{(m)};$$

$$t_m = \begin{cases} t_m & \text{äëü ï èàí î â} \quad [NUR], [NRr] \\ T & \text{äëü ï èàí î â} \quad [NUT], [NRT] \end{cases};$$

t_r - наработка объекта до появления r отказов;

T - установленная продолжительность наблюдений.

Таблица 5.2

Оценка показателей надежности непараметрическим методом

Показатели надежности	Формулы для определения показателей для планов наблюдений	
	[NUN]	[NUR], [NUT]
Средняя наработка до отказа Средний ресурс Средний срок службы Средний срок сохраняемости Среднее время восстановления	$\max t_i \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$	$\frac{\sum_{i=1}^m t_i + (N-m)t_{(m)}}{m}$
Гамма-процентная наработка Гамма-процентный ресурс Гамма-процентный срок службы Гамма-процентный срок сохраняемости	$\max t_i$ $\frac{n(t_{(i)})+1}{N} \leq 1 - \frac{\gamma}{100}$	$\max t_i$ $\frac{n(t_{(i)})+1}{N} \leq 1 - \frac{\gamma}{100}$
Вероятность безотказной работы	$\frac{N-n(t)}{N}$	$\frac{N-n(t)}{N}, t \leq t_m$
Вероятность восстановления работоспособности	$\frac{n(t)}{N}$	$\frac{n(t)}{N}, t \leq t_m$
Интенсивность отказов	$\frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t}$	$\frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t}, t + \Delta t < t_{(m)}$

Задача оценки показателей надежности непараметрическим методом по многократно цензурируемым выборкам включает точечную оценку показателей при количестве отказов $n > 5$. При $n > 5$ следует использовать нижние доверительные границы.

Задача оценки показателей надежности непараметрическим методом по многократно цензурируемым выборкам включает точечную оценку показателей при количестве отказов $n > 5$. При $n > 5$ следует использовать нижние доверительные границы.

Оценка показателей надежности непараметрическим методом при разных планах испытаний (эксплуатационных наблюдений) приведена в табл. 5.3.

Метод позволяет определить точечные оценки вероятности безотказной работы за заданную наработку, средней и гамма-процентной наработок до отказа. Порядок определения перечисленных показателей следующий.

По выстроенному в порядке неубывания наработок до отказа $\tau_i (i = \overline{1, n})$ и возрастания наработок до цензурирования $t_j (j = \overline{1, m})$ вариационному ряду, представленному на рис. 5.4в в виде ранжированной временной диаграммы определяют количество интервалов наблюдения

$$L: (0, \tau_1), (\tau_1, \tau_2), \dots, (\tau_{i-1}, \tau_i), \dots, (\tau_{n-1}, \tau_n).$$

Для каждого интервала наблюдения $l = \overline{1, L}$ подсчитывают число наработок до отказа $\sum_{i=1}^l i = n_l$, и число наработок до цензурирования $\sum_{j=0}^{l-1} j = m_{l-1}$, лежащих между l и $l-1$ интервалами наблюдений. Совокупность этих значений должна удовлетворять условиям

$$\sum_{l=0}^L \sum_{i=1}^l i = \sum_{i=1}^L n_l = n, \quad \sum_{L=2}^L \sum_{j=0}^{l-1} j = \sum_{l=2}^L m_{l-1} = m.$$

Общее число наблюдаемых изделий $N = n + m$.

Если вариационный ряд начинается с наработки до отказа, то $m_0 = 0$, а если он заканчивается наработкой до отказа, то $m_L = 0$.

Вычисляют величину эквивалентного объема цензурированной выборки в каждом интервале наблюдений $l (l = \overline{1, L-1})$

$$N_{\hat{Y}l} = N_{Yl} \left[1 - \frac{m_l}{N - m_{l-1} - n_l} \right],$$

где $N_{\hat{Y}l} = N - m_0$.

Затем вычисляют эмпирическую функцию распределения, соответствующую каждой наработке до отказа в исходном вариационном ряду:

если i - я наработка до отказа принадлежит первому интервалу наблюдений, то

$$\hat{F}_1(t_i) = \frac{i - m_0}{N_{\hat{Y}1}};$$

если i - я наработка до отказа принадлежит l -му ($l = \overline{2, L}$) интервалу наблюдения, то

$$\hat{F}_l(t_i) = \sum_{i=1}^l \frac{i}{N_{\hat{Y}(l-1)}} + \frac{i - \sum_{j=0}^{l-1} j - \sum_{i=1}^{l-1} i}{N_{\hat{Y}l}}.$$

Расчет $\hat{F}_l(t_i)$ удобно вести в табличной форме с шагом $i = I$ до n .

Точечная оценка вероятности безотказной работы за заданную наработку t_3 при условии, что она меньше максимального наблюдаемого значения наработки до отказа в вариационном ряду $t_3 < \tau_{N-m_L}$ вычисляется по формуле

$$\hat{P}(t_3) = 1 - [d_1 \cdot \hat{F}_l(t_i) + (1 - d_1) \hat{F}(t_{i-1})],$$

где $d_1 = \frac{t_3 - \tau_{i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}};$

τ_i, τ_{i-1} - наработки до отказа, между которыми лежит наработка t_3 .

Точечную оценку средней наработки до отказа вычисляют по формуле:

$$T^* = \sum_{l=1}^L \frac{\sum_{i=V_{l+1}}^{v_l} \tau_l}{N_{\hat{Y}l}} + [1 - \hat{F}(t_{N-m_L})] \tau_{N-m_L},$$

где

$$U_l = m_0 + n_{l-1} + m_{l-1} = m_0 + \sum_{i=1}^{l-1} i + \sum_{j=0}^{l-1} j.$$

$$v_l = U_l + n_l = m_0 + n_{l-1} + m_{l-1} + n_l$$

Точечную оценку гамма-процентной наработки t_j до отказа вычисляют по формуле

$$t_j = (1 - d_2) \tau_{i-1} + d_2 \tau_i,$$

где τ_i, τ_{i-1} - наработки до отказа, для которых выполняется условие:

$$\hat{F}(t_{i-1}) < 1 - \frac{\gamma}{100} < \hat{F}(t_i),$$

а d_2 вычисляют по формуле:

$$d_2 = \frac{\frac{100 - \gamma}{100} - \hat{F}(t_{i-1})}{\hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})}.$$

Если выполнено одно из условий

$$1 - \frac{\gamma}{100} = \hat{F}(t_{i-1}),$$

$$1 - \frac{\gamma}{100} = \hat{F}(t_i),$$

то $t_j = \tau_{i-1}$ или соответственно $t_j = \tau_i$.

Приближенные значения доверительных границ вероятности безотказной работы для доверительной вероятности α вычисляются по формулам:

$$P_H(t_3) = \hat{P}(t_3) - U_{\beta} \sigma_i,$$

$$P_B(t_3) = \hat{P}(t_3) + U_{\beta} \sigma_i,$$

$$\sigma_i = [1 - F(t_{i-1})] \sqrt{\sum_{l=1}^K (N - U_l)(N - v_l)},$$

где U_{β} - квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности β ;

$$\beta = \begin{cases} \alpha & \text{если } \alpha \leq 0,5 \\ \frac{1-\alpha}{2} & \text{если } \alpha > 0,5 \end{cases}$$

определяется по ГОСТ 27.503;

K - номер интервала наблюдения, на котором лежит i -й член вариационного ряда.

Вопросы для самопроверки

1. Охарактеризовать технико-экономическое и социальное значение проблемы обеспечения надежности и качества объектов авиационной техники.
2. Дать характеристику задач обеспечения надежности авиационной техники в условиях эксплуатации.
3. Показать связь надежности авиационной техники с безопасностью полетов летательных аппаратов.
4. Охарактеризовать влияние надежности авиационной техники на эффективность эксплуатации летательных аппаратов.
5. Показать связь надежности авиационной техники с другими учебными дисциплинами.
6. Охарактеризовать роль стандартизации в области надежности техники.
7. Охарактеризовать основные предметы исследования теории надежности.
8. Дать классификацию терминов теории надежности.
9. Дать определения надежности и работоспособности объектов.
10. Охарактеризовать понятия: невосстанавливаемые и восстанавливаемые объекты.
11. Дать определения понятий о свойствах надежности.
12. Объяснить физический смысл терминов: отказ, повреждение, неисправность, дефект.

13. Охарактеризовать понятия: критерий, признак, факт, характер, физическая сущность, причина и последствия отказа.
14. Дать классификацию отказов и повреждений.
15. Охарактеризовать модели возникновения внезапных и постепенных отказов и объяснить причины их появления.
16. Охарактеризовать явления, процессы, события и состояния, приведшие к появлению отказов.
17. Дать классификацию физико-химических процессов, приводящих к отказам и повреждениям.
18. Охарактеризовать нагрузки, вызванные внешними и внутренними факторами.
19. Рассмотреть причины внезапных отказов.
20. Рассмотреть причины постепенных отказов.
21. Раскрыть характер повреждения конструкции при старении материалов.
22. Охарактеризовать повреждения конструкции при изнашивании материалов.
23. Дать характеристику коррозионной повреждаемости конструкций.
24. Охарактеризовать процесс накопления усталостных повреждений.
25. Привести примеры типовых отказов и повреждений летательных аппаратов и авиадвигателей.
26. Показать случайный характер процессов изменения параметров объектов, определяющих их работоспособность.
27. Установить связь характеристик распределения параметров и допусков на параметры с показателями безотказности объектов.
28. Охарактеризовать критерии, определяющие возможность индивидуального прогнозирования изменения параметров от наработки объекта.
29. Дать характеристику линейным моделям изменения параметров объектов.
30. Охарактеризовать экспоненциальные модели изменения параметров объектов.
31. Физическая сущность безотказности невосстанавливаемых объектов.
32. Использование распределений непрерывных случайных величин в качестве модели безотказности невосстанавливаемых объектов.
33. Характеристики экспоненциального закона распределения наработки до отказа.
34. Характеристики закона распределения Вейбулла наработки до отказа.
35. Характеристики нормального закона распределения наработки до отказа.
36. Вероятность безотказной работы невосстанавливаемого объекта.

37. Изменение плотности вероятности наработки до отказа при разных законах распределения.
38. Изменение интенсивности отказов от наработки при разных законах распределения.
39. Аналитические зависимости между показателями безотказности восстанавливаемых объектов.
40. Охарактеризовать физическую сущность безотказности восстанавливаемых объектов.
41. Какие функции распределения числа отказов используются в качестве моделей безотказности восстанавливаемых объектов?
42. Охарактеризовать характеристики и условия применения гипергеометрического распределения?
43. Охарактеризовать характеристики и условия применения биномиального распределения.
44. Привести характеристики и условия применения распределения Пуассона.
45. Привести аналитические зависимости между характеристиками безотказности восстанавливаемых объектов.
46. Охарактеризовать единичные показатели надежности.
47. Безотказность как одно из свойств надежности.
48. Какие используются показатели безотказности и методы их определения.
49. Долговечность как одно из свойств надежности.
50. Какие используются показатели долговечности и методы их определения.
51. Ремонтпригодность как одно из свойств надежности.
52. Какие используются показатели ремонтпригодности и методы их определения.
53. Сохраняемость, как одно из свойств надежности.
54. Какие используются показатели сохраняемости и методы их определения.
55. Параметры основных законов распределения непрерывных и дискретных случайных величин.
56. Методы оценки параметров распределения наработки до отказа.
57. Критерии согласия и их применение.
58. Определение и физическая сущность комплексных показателей надежности.
59. Методы расчета коэффициента готовности.
60. Методы расчета коэффициента технического использования.
61. Методы расчета коэффициента оперативной готовности.
62. Комплексная оценка надежности.
63. Виды испытаний и их классификация.

64. Виды испытаний на надежность.
65. Виды испытаний на ремонтпригодность.
66. Ускоренные испытания.
67. Классификация планов испытаний.
68. Источники и задачи информации о надежности объектов.
69. Полные и цензурированные данные эксплуатационных наблюдений.
70. Непараметрические методы оценки.
71. Точечная оценка показателей надежности.
72. Интервальная оценка показателей надежности.
73. Оценка показателей надежности по однократно цензурированным выборкам.
74. Оценка показателей надежности по многократно цензурированным выборкам.
75. Оценка показателей надежности для восстанавливаемых объектов.
76. Охарактеризуйте непараметрические методы оценки показателей надежности объектов.
77. Точечная оценка показателей надежности объектов.
78. Интервальная оценка показателей надежности объектов.
79. Оценка показателей надежности по однократно цензурированным выборкам.
80. Оценка показателей надежности по многократно цензурированным выборкам.
81. Оценка показателей надежности восстанавливаемых объектов.

Литература

1. Воскобоев В.Ф. Надежность технических систем и техногенный риск. Надежность технических систем: учеб. пособие. - М.: Альянс, Путь, 2008. – Ч.1.
2. Ицкович А.А. Надежность летательных аппаратов и авиадвигателей: учеб. пособие. - М.: МИИГА, 1990. – Ч.1.
3. Ицкович А.А. Надежность летательных аппаратов и двигателей: учеб. пособие. - М.: МГТУГА, 1995. – Ч. 2.
4. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Надежность авиационной техники: пособие по выполнению лабораторных работ «Анализ физической сущности типовых отказов и повреждений авиационной техники». - М.: МГТУ ГА, 2011.
5. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Надежность авиационной техники: пособие по выполнению практических занятий «Оценка показателей надежности авиационной техники». - М.: МГТУ ГА, 2012.
6. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Надежность авиационной техники: пособие по выполнению контрольной работы. - М.: МГТУ ГА, 2006.
7. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Эффективность процессов эксплуатации летательных аппаратов: пособие по выполнению курсового проекта «Анализ эффективности процессов эксплуатации изделий летательных аппаратов». - М.: МГТУ ГА, 2005.
8. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Анализ новой терминологии по надежности по ГОСТ Р 27.002-2009 и возможности ее применения при эксплуатации авиационной техники // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. № 173 (11). - С. 48-51.
9. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Обеспечение надежности авиатехники на основе современных стандартов // Международный авиационно-космический журнал Авиасоюз № 1 (44) январь-февраль 2013 г. - М.: ООО «Авиасоюз», 2013. - С. 33-35.
10. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
11. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
12. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем: учеб. пособие. - М.: Дрофа, 2008.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
1.	Предмет основ теории надежности, основные термины и определения	4
1.1.	Предмет и задачи надежности	4
1.2.	Стандартизация в области надежности техники	6
1.3.	Основные понятия, термины и определения	8
2.	Физические основы надежности	13
2.1.	Классификация отказов и механизмы их возникновения	13
2.2.	Классификация причин отказов	16
2.3.	Физико-химические процессы, приводящие к отказам	20
3.	Модели надежности объектов	37
3.1.	Модели развития повреждений и возникновение отказов	37
3.2.	Модели надежности невосстанавливаемых объектов	41
3.3.	Модели надежности восстанавливаемых объектов	49
4.	Показатели надежности объектов	53
4.1.	Классификация показателей надежности	53
4.2.	Показатели безотказности объектов	54
4.3.	Показатели долговечности объектов	57
4.4.	Показатели сохраняемости объектов	59
4.5.	Показатели ремонтпригодности объектов	60
4.6.	Комплексные показатели надежности объектов	61
5.	Оценка показателей надежности по данным испытаний и эксплуатационных наблюдений	63
5.1.	Виды испытаний на надежность	63
5.2.	Планирование испытаний и эксплуатационных наблюдений	64
5.3.	Характеристика исходной информации о надежности объектов	65
5.4.	Классификация методов оценки показателей надежности объектов	71
5.5.	Оценка показателей надежности параметрическим методом	71
5.6.	Оценка показателей надежности непараметрическим методом	78
	Вопросы для самопроверки	84
	Литература	87