КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени А.Н. Туполева

Кафедра Автомобильных Двигателей и Сервиса

ОСНОВЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Составитель: д.т.н., профессор **Крюков В.Г.**

Казань - 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ТЕМА 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: КАЧЕСТВО, РАБОТОСПОСОБНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА	4
ТЕМА 2. ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ	15
ТЕМА 3. МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ	27
ТЕМА 4. СБОР ИНФОРМАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ	47
ТЕМА 5. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СРЕДСТВ ОБСЛУЖИВАНИЯ	56
ТЕМА 6. УПРАВЛЕНИЕ СТАНЦИЯМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ	65

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данном пособии излагается лекционный курс дисциплины “Основы работоспособности технических систем”, читаемой для студентов специальности “Эксплуатация и обслуживание транспортных и технологических машин и оборудования”. Это пособие составлено на базе одноименного курса лекций, который был разработан и читался в течение ряда лет преподавателем кафедры “Прикладной математики” Мелузовым Ю.В., так рано ушедшим от нас. При составлении этого пособия были также использованы следующие библиографические источники:

1. Кузнецов Е. С. Управление техническими системами. – М., МАДИ. 1997.

2. Колобов А.Б. Надежность технических систем. Ивановский Государственный Энергетический Университет. http://www.ispu.ru/library/lessons/Kolobov/index.htm.

3. Фадеева Л. Н., Жуков Ю. В., Лебедев А. В. Теория вероятности и математическая статистика. Задачи и Упражнения, Москва, ЭКСМО, 2006.

4. Надежность технических систем. Справочник / Под ред. И. А. Умакова. — М.: Наука, 1985.

ТЕМА 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: КАЧЕСТВО, РАБОТОСПОСОБНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА

1.1. Техническая система и ее жизненный цикл

Понятие о технической системе

Современное развитие науки позволяет дать достаточно четкое определение технической системы. Этот термин охватывает широкий класс объектов материального мира и ассоциируется с объектом составным, представляющим собой совокупность отдельных узлов и в тоже время объектом комплексным, отдельные части которого функционируют в тесной взаимосвязи друг с другом. Под *технической системой* будем понимать совокупность агрегатов, технических узлов и деталей, объединенных в единое целое для достижения поставленной цели. Примерами технических систем являются: телевизор, компьютер, электрическая пила, гидроэлектростанция, заправочная станция, коробка с набором слесарных инструментов, мотор автомобиля, нефтепровод, навигационный спутник.

С развитием науки и техники происходит увеличение сложности технических систем, и поэтому большое значение имеют общесистемные вопросы, которые рассматривают изменение системы, ее структуру, организацию взаимодействия подсистем, управление системой. В настоящее время сформировалась самостоятельная инженерная дисциплина, получившая название «теория технических систем». Хотя многообразие технических систем не позволяет провести их полную классификацию, можно выделить определенные направления и принципы, по которым эти системы допустимо классифицировать (Рис. 1.1).

Рис. 1.1. Вариант классификации технических систем

В рамках этой классификации можно указать следующие примеры систем:

- централизованные: трактор, АТС на предприятии;
- децентрализованные: двуручная пила, пульт запуска баллистических ракет, система водоснабжения города;
- комбинированные: большие электронно-вычислительные системы, робот, пассажирский самолет в полете;
- простые: ручная дрель, шест для прыгуна в высоту;

- сложные: телевизор, сотовый телефон.
- постоянного использования: доменная печь, Интернет, камера видеонаблюдения;
- непостоянного использования: радиоприемник, видеокамера для съемок;
- промышленного назначения: газовая печь на предприятии, вычислительная станция;
- индивидуального назначения: кухонная газовая плита, персональный компьютер.

Эта классификация не является полной, например, технические системы можно также классифицировать по типу: одноцелевая (обычный легковой автомобиль), многоцелевая (подвижная медицинская лаборатория). При выборе характеристик системы необходимо учитывать все многообразие функций, выполняемых данной системой. В общем случае техническая система может иметь множество характеристик, например, троллейбус может характеризоваться вместимостью, числом сидячих мест, максимальной скоростью, массой, стоимостью, числом дверей для входа, ценой гарантийным ресурсом, типом системы вентиляции салона и т.д. Такие характеристики очень важны для конкретной технической системы и они используются при разработке и эксплуатации таких систем, изучаемых на старших курсах. Наша дисциплина рассматривает обобщенные свойства технических систем и их обобщенные характеристики, к которым можно отнести характеристики: производительности, надежности, стоимости, весовые и геометрические характеристики и экологические характеристики.

К характеристикам производительности можно отнести, например, количество изделий, выпускаемых предприятием в единицу времени, мощность автомобиля и его КПД, мощность гидроэлектростанции.

К характеристикам надежности можно отнести вероятность безотказной работы в течение заданного промежутка времени (для автомобилей - пробег), интенсивность отказа элементов системы, средний срок службы и т.д.

Стоимостные характеристики являются одной из важнейших характеристик системы во многом определяющей целесообразность ее применения. В них входят: стоимость разработки системы, стоимость, проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских, стоимость серийного производства, изготовление образца и стоимость обслуживания, эксплуатации.

Весовые и геометрические характеристики, описывающие массу и размеры системы, зависят от целевого назначения этой системы, конструктивного совершенства агрегатов и надежности узлов.

Экологические показатели определяются свойствами используемых материалов, топлив, совершенством рабочих процессов, протекающих в технических системах.

Жизненный цикл технической системы.

Почти каждая техническая система “проживает” свою жизнь, которую обычно называют жизненным циклом (Рис. 1.2). Эта схема справедлива как для технической системы, так и для разработки ее подсистем.

Целеполагание – это возникновение идеи о какой-то новой технической системе с учетом потребности рынка или народного хозяйства, например, идея сотового телефона, идея беспроводного утюга, идея воздушного велосипеда.

Изыскание – это исследование возможных конструктивных схем, поиск аналогов, разработка конструктивного решения и исследование рынка. Несколько возможных схем изделия передаются на следующий этап

Проектирование – это разработка аванпроектов, в ходе анализа и детализации которых остается один вариант для дальнейшего развития. Он разрабатывается подробно, так чтобы получить с высокой степенью достоверности основные характеристики системы. Разрабатывается также технический проект всего изделия, где в основном уже представляется конструкторское решение в целом.

Конструирование – это детальная проработка всего проекта вплоть до самых мельчайших деталей, так чтобы на опытном производстве или в мастерской это изделие могло быть изготовлено.

Рис. 1.2. Схема жизненного цикла технической системы

Опытное производство и адаптация включает изготовление первого образца изделия или технической системы, а также испытание. Проводится совершенствование образца, его доработка (редко, когда первое испытание заканчивается успешно) с целью достижения наилучших показателей и обеспечения технологичности производства.

Технология – это разработка технологической документации для внедрения в серийное производство. На этапе технологии вырабатывается технологический процесс т.е. на каком оборудовании производить детали, как осуществлять сборку с наименьшими затратами, какое необходимо вспомогательное оборудование, какие детали нужно испытывать, прежде чем приступить к сборке.

Серийное производство – это изготовление множества технических изделий по разработанной технологии. Существует одиночное, мелкосерийное, крупносерийное и массовое производство. Каждый тип производства имеет свои особенности, которые изучаются в специальных дисциплинах

Эксплуатация – это работа технической системы в реальных условиях. В результате эксплуатации появляется информация о достоинствах и недостатках технической системы, обусловленные: малым числом испытаний на предыдущих этапах, недостаточной квалификацией персонала и работой в реальных условиях. Ваша специальность непосредственно связана с этим этапом жизненного цикла технических систем.

Реконструкция (модификация) – на этом этапе собираются и анализируются замеченные недостатки, выявленные на этапе эксплуатации (трудность управления, недостаточная надежность, неожиданные эффекты и аварии на некоторых режимах работы, необходимость увеличения ресурса, неповторяемость характеристик и т.д.). В ходе этого анализа в конструкцию вводятся изменения, устанавливаются дополнительные датчики, уточняется нормативно- техническая документация.

Вся информация на каждом этапе собирается в *базу знаний*. Роль базы знаний очень важна и именно она определяет успех реализации технической системы, ее свойства и конкурентоспособность. Об этом свидетельствуют немецкие автомобили, японские роботы, американская авиация, советская ракетная техника и т.д. Для простых систем ряд этапов, естественно, может отсутствовать. В настоящее время с появлением мощных информационно-проектных систем: ANSYS КОМПАС FLUID и

т.д. происходит значительное изменение в методологии проектирования и создания изделий.

Эксплуатация автотранспорта.

Автотранспорт, как некоторая важнейшая техническая система, к которой относится ваша специальность, также включает этап эксплуатации, который будем называть “Сервис и техническая эксплуатация системы автотранспорта”. Одной из важных задач его эксплуатации является поддержание автомобилей в технически исправном состоянии, на которое влияют следующие факторы:

- климатические и дорожные условия;
- скоростные и нагрузочные характеристики эксплуатации;
- качество проведения технического обслуживания и текущего ремонта;
- качество топлива и горюче смазочных материалов (ГСМ);
- совершенство конструкции автомобиля;
- методы управления автомобиля.

В условиях перехода к рыночным отношениям перестроилась система управления всем автотранспортом, исчезли вертикальные связи управления, возникли специфические задачи использования автотранспорта, которые требуют от специалистов более своевременных управляющих действий, выработки экономически обоснованных решений и, как следствие, повышение квалификации руководителей всех уровней и специалистов. Сервис и техобслуживание автомобилей являются составными частями автотранспортного комплекса (АТК), и в условиях рыночной экономики их доля существенно возрастает. Обслуживание легковых автомобилей за рубежом по объему получаемых средств занимает первое место среди разнообразных видов обслуживания населения. Так годовой объем предприятий США специализирующихся в сфере автомобильного обслуживания составляет свыше 300 миллиардов долларов, что примерно вдвое превышает стоимость выпускаемых в год в США автомобилей. В этой сфере занято достаточно большая доля трудоспособного населения.

При рыночной экономике также меняется схема ремонта и обслуживания автомобилей. При плановом хозяйстве обслуживание автомобилей, особенно государственного сектора, велось на основе оперативно-командного планирования. В условиях рыночной экономики их обслуживание производится на основе определения его технического состояния, и ремонта по потребности. Такой подход позволяет сократить затраты на поддержание работоспособности автомобиля примерно на 15-20%. Таким образом, происходит перераспределение средств на поддержание транспортных средств в рабочем состоянии по всем этапам жизненного цикла автомобиля. Примерное распределение затрат на 1 автомобиль показано в Таблице 1.1

Таблица 1.1. Распределение затрат на 1 автомобиль

Затраты	Россия	США	Германия
Приобретение автомобиля	49%	28%	23%
Обслуживание, ремонт, запчасти	21%	16%	17%
Топливо и ГСМ	18%	28%	30%
Стоянка	4%	10%	12%
Страхование	5%	12%	11%
Налоги	3%	8%	7%

Обычно техническая эксплуатация и сервис включают следующие основные виды работ:
- подбор и доставка необходимых для автотранспортного предприятия автомобилей, запасных частей, оборудования, инструментов, покупку и продажу новых и подержанных автотранспортных средств;
- предпродажную подготовку и ремонт в течении гарантийного периода; предоставление автотранспортных средств в аренду, прокат и лизинг;
- модернизацию, переоборудование и дооснащение транспортных средств, тюнинг;
- техническая помощь на дорогах, сборка и утилизация отходов, образующихся при эксплуатации и износе транспортных средств.

1.2. Качество и работоспособность технических систем

Основные показатели качества

Качество технической системы охватывает различные конструктивные и технические свойства, определяющие трудоемкость производства технической системы и эффективность ее эксплуатации. Как правило, определение качества автомобилей проводится не только по значениям конструктивных и технических параметров, но и в результате их сравнения с параметрами другой технической системы. Под качеством автомобиля понимается сочетание отличительных свойств и конструктивных особенностей, которые характеризует его достоинства и степень потребительского совершенства применительно к определенным условиям его использования.

К основным показателям качества относят:

Надежность – это свойство автомобиля выполнять заданные функции, сохраняя значения установленных показателей в заданных пределах в течение определенного промежутка времени или наработки. Под наработкой принято понимать процесс эксплуатации, измеряемой в километрах.

Безопасность движения, которая обеспечивается рядом конструктивных решений, в частности: тормозной системой, рулевым управлением, безосколочным разбитием лобового стекла и другими характеристиками, сохраняющими жизнь человека.

Гигиеничность: к ней следует отнести комфортные показатели температуры, влажности, уровня шума в салоне, минимальные вибрация и статическое электричество.

Ремонтопригодность, которая характеризуется стоимостью и трудоемкостью ремонтных работ, средним временем ремонта, доступностью и удобством выполнения работы.

Топливная экономичность и снижение токсичности отработавших газов. Этому компоненту качества уделяется большое внимание, так как автотранспорт является крупнейшим потребителем мировых энергетических ресурсов. Например, в загрязнении воздушного бассейна в Нью-Йорке доля автомобильных двигателей составляет до 85% по CO, до 50% по CH_2 и до 35% NO_x.

Понятие о техническом состоянии автомобиля

Техническое состояние автомобиля, его узлов и агрегатов определяется совокупностью, изменяющихся свойств его элементов, характеризуемых текущим значением конструктивных и технологических параметров. Составляется таблица конструктивных элементов автомобиля и его технических и конструктивных параметров (Таблица 1.2). В ряде случаев ее размещают в паспорте автомобиля.

Текущие значения конструктивных и технических параметров связывают с наработкой изделия. Под наработкой автомобиля понимают продолжительность работы, измеряемой в единице пробега, либо временем работы, либо числом циклов

(пример: для вилки коробки передачи, под наработкой понимается число циклов переключения передачи; для механизма управления - число включений и выключений).

Таблица 1.2. Пример набора конструктивных элементов и их параметров, определяющих техническое состояние

Конструктивный элемент	Число	Конструктивный параметр	Технологический параметр
1. Силовой агрегат	1-2	Подвижность	Шумы, вибрации
2. Тормозная система ……	1;2; ……..	Давление в трубопроводах …….	Зазоры, течи в соединениях ……..

В процессе эксплуатации автомобиля происходит изменение его технического состояния в силу износа трущихся поверхностей, увеличения зазоров, изменения физико-химических свойств материалов, что приводит к снижению технико-экономических показателей. Соответственно, процессы, протекающие при эксплуатации автомобиля, можно разделить на 2 типа:

- *функциональные*, для которых характерна жесткая связь между зависимыми переменными и аргументами (например, зависимость мощности двигателя от расхода топлива);
- *случайные*, характеризующиеся тем, что влияние многих факторов, как правило, нельзя оценить однозначно (например, влияние квалификации водителя на износ коробки передач).

Среди детерминированных факторов можно указать: наработку, временное воздействие, природно-климатическое воздействие, а среди случайных факторов - дорожные условия, квалификация водителя, физико-химические свойства ГСМ. У значительной части узлов, агрегатов процесс изменения технического состояния в зависимости от наработки носит плановый характер, приводящий к возникновению постепенных отказов. Другие износы протекают достаточно быстро.

Обычно различают наработку с начала эксплуатации изделия, наработку на отказ и наработку до определенного состояния. По мере увеличения наработки происходит изменение технического состояния автомобиля и уход конструктивных и технических параметров от номинальных значений. Поэтому выделяют предельное состояние y_n какого-либо параметра, предельно допустимое $y_{nд}$. Часто составляют графики изменения наработки (Рис. 1.3).

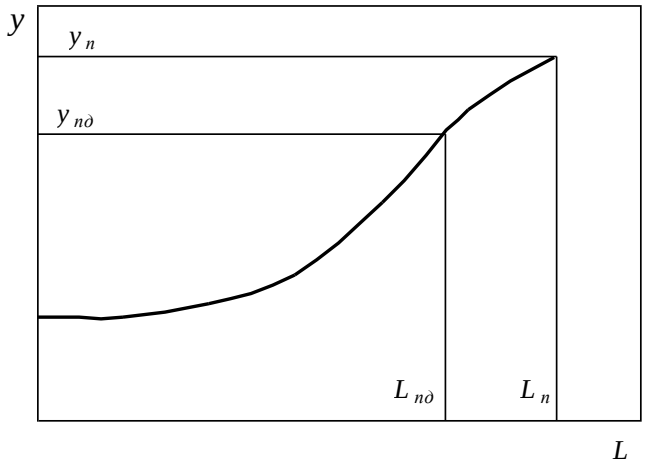

Рис. 1.3. Зависимость типичного конструктивного параметра от времени наработки
L_n – предельная наработка изделия; $L_{nд}$ – предельно-допустимая наработка изделия.

Известно, что номинальные, предельные и предельно-допустимые значения конструктивных и технических параметров устанавливаются государственными стандартами или нормативно-технической документацией, помещаемой в справочных изданиях или в сервисных книгах по обслуживанию автомобиля.

Причины и последствия изменения технического состояния

Основными причинами изменения конструктивных и технологических параметров, и, следовательно, технического состояния автомобиля, являются:
- нагрузки на элементы конструкции;
- взаимное перемещение элементов;
- воздействие тепловой энергии и химически активных компонентов;
- воздействие внешней среды (грязь, влага, изменение температуры, специфические климатические условия).

В результате происходят разного рода изнашивания, разрушения, коррозия.

Изнашивания происходят под воздействием трения и зависят от свойств материала, качества обработки поверхности, смазки, нагрузки, скоростей взаимного перемещения поверхностей и уровня теплового воздействия. Обычно в практике технической эксплуатации автомобиля выделяют абразивные, усталостные, коррозионно-окислительные изнашивания. *Абразивные изнашивания* происходят за счет попадания в смазываемую среду твердых частиц, находящихся между поверхностями, при этом в качестве данных частиц выступают сами продукты изнашивания, как отделившиеся частицы от трущихся деталей. *Усталостные изнашивания* состоят в том, что поверхностный слой материала в результате трения и циклической нагрузки становится хрупким, при этом образуются микротрещины и ямки, такой процесс называется *питинг* и он характерен в большей степени для подшипников. Питинг приводит к увеличению зазоров в подшипниках ухудшению смазки трущихся поверхностей и последующему выходу подшипника из строя.

Пластические деформации связаны с превышением пределов текучести металлов. Данный вид разрушений является следствием нарушений правил эксплуатации.

Усталостные разрушения, как правило, возникают вследствие увеличения нагрузок, при этом возникает постоянное накапливание числа и увеличение размеров усталостных трещин.

Коррозия происходит вследствие агрессивного воздействия окружающей среды, приводит к окислению металла и, как следствие, к потере прочности конструкции. Коррозия, главным образом, поражает детали кузова легкового автомобиля и кабины грузового автомобиля. Потери от коррозии самые значительные по отношению к другим причинам, выводящим автомобиль из эксплуатации (Таблица 1.3).

Таблица 1.3. Причины отказа и их влияние на выход автотранспорта из эксплуатации

Причины отказа	**Автомобиль (%)**	Автобус (%)
Износ	4	12
Пластические деформации	26	29
Усталостные разрушения	8	10
Температур. разрушения	12	11
Коррозия	40	37

1.3. Работоспособность и диагностика технической системы

Основные определения.

В процессе эксплуатации технической системы возникают задачи по оценке ее состояния, которое может характеризоваться следующими понятиями:

Исправность – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

Работоспособность – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных НТД. Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач. Понятие исправности “жестче”, чем понятие работоспособности. Работоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Таким образом, если объект неработоспособен, то это свидетельствует о его неисправности. С другой стороны, если объект неисправен, то это не означает, что он неработоспособен.

Правильность функционирования – это такое состояние технической системы, при котором она и ее составные части выполняют в текущий момент времени предписанные им алгоритмы функционирования со значениями параметров соответствующих установленным требованиям.

Предельное состояние – это такое состояние параметров системы, при котором ее дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за нарушения требования безопасности или снижения эффективности функционирования подсистем или агрегатов.

Предельно-допустимое состояние – это такое состояние, при котором следует рассмотреть вопрос о дальнейшей эксплуатации технической системы в силу того, что ряд параметров близок к их предельному состоянию.

Наработка технической системы до предельного состояния называется ресурсом изделия. Наработка до отказа часто называется “наработкой на отказ”. Решение задач по определению технического состояния автомобиля возможно в том случае, когда имеются эффективные средства оценки фактического состояния и определенные качества функционирования системы. Для оценки состояния автомобиля необходимо в ряде случаев воспроизводить его рабочие функции или фиксировать определенные реакции на специальные контрольные воздействия.

Для обеспечения работоспособности автомобиля применяют три способа:

1. Поддержание заданного уровня работоспособности изделия. Инструментом метода является техническое обслуживание и мелкий ремонт.
2. Восстановление утраченной работоспособности. Инструментом метода являются средний и капитальный ремонт;
3. Комбинации методов 1 и 2.

Первой метод характерен для новых изделий и изделий с незначительным сроком эксплуатации. Второй метод наиболее приемлем для изделий с достаточно долгой эксплуатацией, то есть для автомобилей, которые содержат состарившиеся элементы и узлы. Например, в результате длительной эксплуатации резинотехнические изделия в силу старения теряют свою работоспособность. Поэтому требуется восстановление утраченной работоспособности, которая осуществляется ремонтом или заменой.

Оценка работоспособности технической системы.

При оценке работы технической системы используют как структурные, так и диагностические параметры. Так же учитывают скоростные и динамические характеристики как системы в целом, так и ее подсистем. Определяя значения параметров и характеристик, оценивают состояние системы и определяют возможность

ее дальнейшей эксплуатации, при этом, из всей совокупности параметров выделяют следующие:

$Y_{iн}$, $S_{iн}$ ($i = 1,\ldots, n$) - номинальные значения рабочих (структурных) и диагностических параметров, которые определяются конструкторской документацией и качеством изготовления изделия

Y_{in}, S_{in} ($i = 1,\ldots, n$) - предельные значения рабочих (структурных) и диагностических параметров, превышения которых приводит к отказу системы или определяет порог использования системы.

$Y_{inд}$, $S_{inд}$ ($i = 1,\ldots, n$) - предельно-допустимые значения рабочих (структурных) и диагностических параметров, которые являются близкими к предельным и фиксируются заранее. Например, если глубина протектора шин легкового автомобиля менее 1,5 мм, то их дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена.

Y_i , S_i ($i = 1,\ldots, n$) - текущие значения рабочих и структурных параметров, определяемых в период эксплуатации, по которым производится оценка состояния системы, прогнозируется остаточный ресурс.

Перечень неисправностей и условий, при которых запрещена эксплуатация транспортных средств, устанавливается на федеральном уровне нормативными актами.

Техническое состояние автомобиля определяется текущим значением рабочих параметров Y_i, которые определяются прямым или косвенным методом (Рис 1.4)

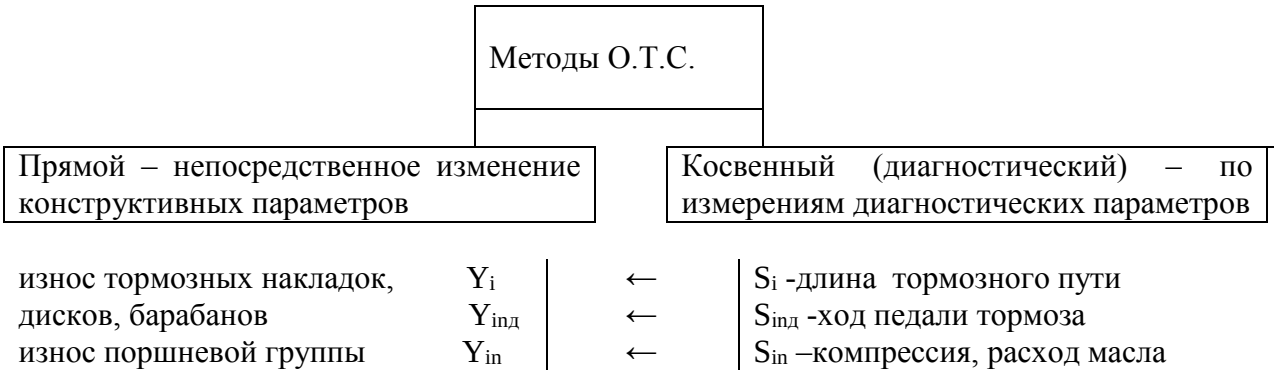

Рис 1.4. Прямые и косвенные методы определения рабочих параметров

Свойства диагностических параметров

При определении технического состояния автомобиля, как мы отмечали выше, оценку работоспособности его можно производить непосредственно по значениям рабочих параметров, а также по значениям диагностических параметров. Для определения значений рабочих параметров часто приходится производить разборку того или иного агрегата, что связано с высокой трудоемкостью данных работ. Желательно, чтобы диагностические параметры имели следующие свойства:

- ***однозначность*** определяется тем, что при изменении параметра Y_i в пределах $Y_{iн} \ldots Y_{in}$ имеется соответствие $Y_i \leftrightarrow S_i$ т.е. одному значению Y_i соответствует только одно значение S_i ,где S_i –диагностический параметр;
- ***чувствительность*** характеризуется тем, что приращение ΔS_i по отношению к изменению конструктивного параметра является постоянным, т.е. $\Delta Y_i/\Delta S_i$ =const либо изменяется очень незначительно;
- ***стабильность*** устанавливает возможную величину отклонения диагностического параметра от своего расчетного;
- ***доступность и удобство измерения*** предусматривает измерение параметров без разборки подсистем узлов агрегата, либо незначительную разборку узла;

- ***информативность*** позволяет обеспечить через измерение диагностических параметров S_i достаточно полную информацию о параметрах системы Y_i.

Заметим, что чем больше число измеряемых диагностических параметров, тем более полной является информация о состоянии технической системы, но при этом повышается трудоемкость и стоимость диагностирования. При выборе диагностических параметров необходимо предусмотреть, чтобы они были независимы. Как правило, выбор этих параметров осуществляется на основе накопленного опыта с использованием рекомендации, содержащихся в нормативно-технической документации. Многочисленные диагностические параметры условно можно разделить на 2 класса:

1. Диагностические параметры выходных характеристик рабочих процессов, которые характеризуют основные функциональные свойства автомобиля и его систем. К ним можно отнести мощность двигателя, максимально допустимую скорость, расход топлива, рабочую температуру двигателя, тормозной путь.
2. Диагностические параметры сопутствующих процессов, которые сопровождают работу автомобиля в целом и его подсистем к ним можно отнести: уровень шума и вибрации, содержание продуктов износа деталей в масле и т.д.

Средства диагностирования обычно разделяют на внешние и встроенные (Таблица 1.4).

Таблица 1.4. Классификация средств диагностирования

Средства диагностирования	
Внешние	Встроенные
стационарные	информационные
передвижные	стационарные
переносные	программируемые

К внешним следует отнести различные стенды, такие как: стенд проверки установки углов схождения и развала, тормозной стенд, диагностический стенд. Примером переносного средства диагностирования является прибор для определения уровня загрязнения в отработанных газах.

Встроенные средства диагностирования являются конструкционными элементами автомобиля. Они позволяют контролировать некоторые рабочие параметры автомобиля, сигнализируют о возможности наступления отказа, либо непосредственно о самом отказе.

Следует заметить, что прямой и косвенный методы диагностирования автомобиля в большинстве случаев используются совместно с целью получения минимальных затрат на определение технического состояния автомобиля. Например, процесс диагностирования двигателя начинают с использования косвенного метода по значению параметра типа S_i, и, если результат выполненного диагностирования является неудовлетворительным, то используют прямой метод с частичной разборкой двигателя.

Контрольные вопросы.

1. Приведите примеры технических систем находящихся на кухне вашей квартиры?
2. Какие этапы жизненного цикла автомобиля имеют отношение к вашей специальности (специальность 190603)?
3. Что такое база знаний? Что она включает?
4. Что такое целеполагание (как этап жизненного цикла)?

5. Какие факторы влияют на эксплуатацию автомобиля?
6. Почему (в отличие от плановой) в условиях рыночной экономики улучшились качество и быстрота сервиса?
7. Какие виды работ включает техническое обслуживание и сервис?
8. Какая разница между сервисом и техническим обслуживанием?
9. Назовите основные показатели качества?
10. Что такое наработка двигателя?
11. Какая разница между предельным состоянием и предельно допустимым состоянием?
12. Какая разница между усталостным изнашиванием и усталостным разрушением?
13. Перечислите виды изнашивания?
14. В чем общность и отличие понятий «исправность» и «работоспособность» объекта?
15. Что такое диагностические параметры? Приведите примеры этих параметров.
16. Перечислите требования к диагностическим параметрам?
17. Что такое однозначность диагностических параметров?
18. Что такое чувствительность диагностических параметров?

ТЕМА 2. ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Основные понятия надежности. классификация отказов

Основные понятия

Надежность – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени и в заданных пределах значения установленных эксплуатационных показателей (см. п.1.2).

Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

- при неустранимом нарушении безопасности;
- при неустранимом отклонении величин заданных параметров;
- при недопустимом увеличении эксплуатационных расходов.

Для некоторых объектов предельное состояние является последним в его функционировании, т.е. объект снимается с эксплуатации, для других – определенной фазой в эксплуатационном графике, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ. В связи с этим, объекты могут быть:

- *невосстанавливаемые*, для которых работоспособность в случае возникновения отказа, не подлежит восстановлению;
- *восстанавливаемые*, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путем замены.

К числу невосстанавливаемых объектов можно отнести, например: подшипники качения, полупроводниковые изделия, зубчатые колеса и т.п. Объекты, состоящие из многих элементов, например, станок, автомобиль, электронная аппаратура, являются восстанавливаемыми, поскольку их отказы связаны с повреждениями одного или немногих элементов, которые могут быть заменены. В ряде случаев один и тот же объект в зависимости от особенностей, этапов эксплуатации или назначения может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Критерий отказа – отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа.

Классификация и характеристики отказов

Отказы по типу подразделяются на:

отказы функционирования (выполнение основных функций объектом прекращается, например, поломка зубьев шестерни);

отказы параметрические (некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах, например, потеря точности станка).

По своей природе отказы могут быть:

случайные, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п.;

систематические, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п.

Основные признаки классификации отказов:

- характер возникновения;
- причина возникновения;
- характер устранения;
- последствия отказов;
- дальнейшее использование объекта;
- легкость обнаружения;
- время возникновения.

Рассмотрим подробнее каждый из классификационных признаков:

характер возникновения:

- *внезапный отказ* – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта; внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробои изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы

- *постепенный отказ* – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта. Постепенные отказы - связаны с износом деталей и старением материалов;

причина возникновения:

конструкционный отказ, вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта;

производственный отказ, связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии;

эксплуатационный отказ, вызванный нарушением правил эксплуатации.

характер устранения:

устойчивый отказ;

перемежающийся отказ (возникающий/исчезающий).

последствия отказа:

легкий отказ (легкоустранимый);

средний отказ (не вызывающий отказы смежных узлов – вторичные отказы);

тяжелый отказ (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека).

дальнейшее использование объекта:

полные отказы, исключающие возможность работы объекта до их устранения;

частичные отказы, при которых объект может частично использоваться.

легкость обнаружения:

очевидные (явные) отказы;

скрытые (неявные) отказы.

время возникновения:

приработочные отказы, возникающие в начальный период эксплуатации;

отказы при нормальной эксплуатации;

износовые отказы, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и пр.

Составляющие надежности

Надежность является комплексным свойством, включающим в себя в зависимости от назначения объекта или условий его эксплуатации ряд простых свойств:

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

Наработка – продолжительность или объем работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения, километры пробега и т. п.).

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособности путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять требуемые эксплуатационные показатели в течение (и после) срока хранения и транспортирования.

В зависимости от объекта надежность может определяться всеми перечисленными свойствами или частью их. Например, надежность колеса зубчатой передачи, подшипников определяется их долговечностью, а станка – долговечностью, безотказностью и ремонтопригодностью.

Показатели надежности количественно характеризуют, в какой степени данному объекту присущи определенные свойства, обусловливающие надежность. Одни показатели надежности (например, технический ресурс, срок службы) могут иметь размерность, ряд других (например, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности) являются безразмерными.

Рассмотрим, например, показатели надежности обуславливающие- долговечность.

Технический ресурс – наработка объекта от начала его эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния. Строго говоря, технический ресурс может быть регламентирован следующим образом: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т. п. Если регламентация отсутствует, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех видов ремонтов. Для невосстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

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

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации (в том числе, хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния.

На Рис.2.1 приведена графическая интерпретация перечисленных показателей, при этом:

$t_0 = 0$ – начало эксплуатации t_1, t_5 – моменты отключения по технологическим причинам;

t_2, t_4 t_6, t_8 – моменты включения объекта;

t_3, t_7– моменты вывода объекта в ремонт, соответственно, средний и капитальный;

t_9– момент прекращения эксплуатации; t_{10} – момент отказа объекта.

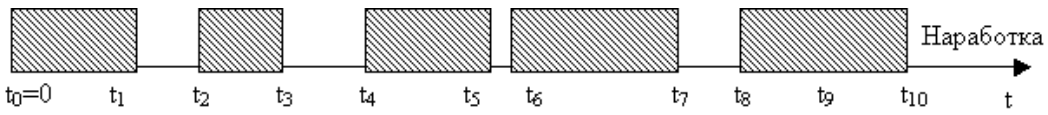

Рис 2.1. Иллюстрация показателей надежности

Технический ресурс (наработка до отказа)

$$T_P = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$

Назначенный ресурс

$$T_H = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t7 - t_6) + (t_9 - t_8).$$

Срок службы объекта $T_C = t_{10}$. Для большинства технических объектов в качестве критерия долговечности чаще всего используется технический ресурс.

2.2. Количественные показатели безотказности

Общие понятия

Наиболее важными показателями надежности невосстанавливаемых объектов являются показатели безотказности, к которым относятся:

- *вероятность безотказной работы;*
- *плотность распределения отказов;*
- *интенсивность отказов;*
- *средняя наработка до отказа*.

Показатели надежности представляются в двух формах (определениях):

- *статистическая* (выборочные оценки); Эта форма показателей получается по результатам ограниченного числа испытаний на надежность. Для обозначения статистических оценок будем использовать знак ^ (“шляпка”). Показатели, определенные для выборки, и, позволяющие сделать какие-то выводы о случайной величине, являются выборочными (статистическими) оценками
- *вероятностная*. Эта форма получается из общей «генеральной совокупности», имеющей неограниченный объем данных о наработке до отказа объекта Количественные показатели, определенные для «генеральной совокупности», являются истинными (вероятностными) показателями, поскольку объективно характеризуют случайную величину – наработку до отказа

Допустим, что в ходе испытаний какого-то числа однотипных объектов получено конечное число интересующего нас параметра – наработки до отказа. Полученные числа представляют собой статистическую выборку, которая при достаточно большом числе испытаний (большой выборке) приближается к вероятностной. Вероятностная форма представления показателей удобна при аналитических расчетах, а статистическая – при экспериментальном исследовании надежности. Обычно принимается следующая схема испытаний для оценки надежности:

Пусть на испытания поставлено N одинаковых серийных объектов. Условия испытаний идентичны, а испытания каждого из объектов проводятся до его отказа. Введем следующие обозначения:

$T = \{0, t1, \ldots t_N\} = \{t\}$ – случайная величина наработки объекта до отказа;
$N(t)$ – число объектов, работоспособных к моменту наработки t;
$n(t)$ – число объектов, отказавших к моменту наработки t;
$\Delta n(t, t + \Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале наработки $[t, t + \Delta t]$;
Δt – длительность интервала наработки.

Вероятность безотказной работы (ВБР)

Статистическая оценка ВБР (эмпирическая функция надежности) определяется отношением числа $N(t)$ объектов, безотказно проработавших до момента наработки t, к числу объектов, исправных к началу испытаний ($t = 0$) - к общему числу объектов N:

$$\hat{P}(t) = \frac{N(t)}{N} \qquad (2.1)$$

Оценку ВБР можно рассматривать как показатель доли работоспособных объектов к моменту наработки t.

Поскольку $N(t) = N - n(t)$, то ВБР по (2.1)

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

где $\hat{Q}(t)= n(t)/N$ (t) – оценка вероятности отказа (ВО).

В статистическом определении оценка ВО представляет эмпирическую функцию распределения отказов. Так как события, заключающиеся в наступлении или не наступлении отказа к моменту наработки *t*, являются противоположными, то

$$\hat{Q}(t)+\hat{P}(t)=1 \qquad (2.3)$$

Нетрудно убедиться, что ВБР является убывающей, а ВО – возрастающей функцией наработки. Действительно

- в момент начала испытаний $t = 0$ число работоспособных объектов равно общему их числу $N(0) = N$, а число отказавших - $n(0) = 0$, поэтому $\hat{P}(0)=1$, а $\hat{Q}(0)=0$;
- при наработке $t \to \infty$ все объекты, поставленные на испытания, откажут, т. е. $N(\infty) = 0$, а $n(\infty) = N$, поэтому $\hat{P}(\infty)=0$, а $\hat{Q}(\infty)=1$.

Вероятность безотказной работы определяется по соотношению:

$$P(t) = B\{T \geq t\}. \qquad (2.4)$$

Таким образом, ВБР есть вероятность того, что случайная величина наработки до отказа *T* окажется не меньше некоторой заданной наработки *t*. Очевидно, что ВО будет являться функцией распределения случайной величины *T* и представляет из себя вероятность того, что наработка до отказа окажется меньше некоторой заданной наработки *t*:

$$Q(t) = B\{T < t\}. \qquad (2.5)$$

Графики ВБР и ВО приведены на Рис. 2.2. В пределе, с ростом числа *N* (увеличение выборки) испытываемых объектов, $\hat{P}(t)$ и $\hat{Q}(t)$ сходятся по вероятности (приближаются по значениям) к *P(t)* и *Q(t)*.

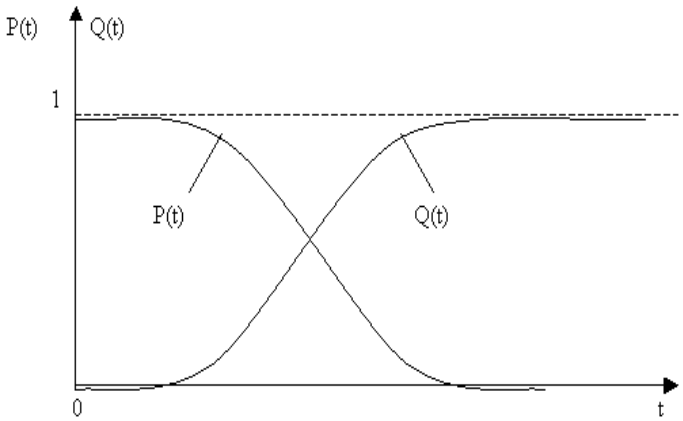

Рис. 2.2. Зависимости *P(t)* и *Q(t)* от наработки

Практический интерес представляет определение ВБР в интервале наработки $[t, t + \Delta t]$, при условии, что объект безотказно проработал до начала *t* интервала. Определим эту вероятность, используя теорему умножения вероятностей, и выделив следующие события:

A = {безотказная работа объекта до момента *t*};
B = {безотказная работа объекта в интервале Δt};
C = A·B = {безотказная работа объекта до момента $t + \Delta t$}.

Очевидно B(C) = P(A·B) = P(A)·P(B| A), поскольку события A и B будут зависимыми. Условная вероятность P(B| A) представляет ВБР *P(t, t + Δt)* в интервале [*t, t + Δt*], поэтому

$$P(B|A) = P(t, t + \Delta t) = P(C)/ P(A) = P(t + \Delta t)/ P(t). \quad (2.6)$$

ВО в интервале наработки [t, t + Δt], с учетом (6), равна:

$$Q(t, t + \Delta t) = 1 - P(t, t + \Delta t) = [P(t) - P(t + \Delta t)] / P(t). \quad (2.7)$$

Плотность распределения отказов (ПРО)

Статистическая оценка ПРО определяется отношением числа объектов *n(t, t + Δt)*, отказавших в интервале наработки [*t, t + Δt*] к произведению общего числа объектов *N* на длительность интервала наработки *Δt*.

$$\hat{f}(t)=\frac{\Delta n(t,t+\Delta t)}{N\cdot\Delta t}\ [\text{ед.наработки}^{-1}] \quad (2.8)$$

Поскольку $\Delta n (t, t + \Delta t) = n (t + \Delta t) - n(t)$, где $n(t + \Delta t)$ – число объектов, отказавших к моменту наработки $t + \Delta t$, то оценку ПРО можно представить:

$$\hat{f}(t)=\frac{n(t+\Delta t)-n(t)}{N\cdot\Delta t}=\frac{1}{\Delta t}\left[\hat{Q}(t+\Delta t)-\hat{Q}(t)\right]=\frac{\hat{Q}(t,t+\Delta t)}{\Delta t} \quad (2.9)$$

где $\hat{Q}(t,t+\Delta t)$ – оценка ВО в интервале наработки, т. е. приращение ВО за *Δt*.

Оценка ПРО представляет «частоту» отказов, т. е. число отказов за единицу наработки, отнесенное к первоначальному числу объектов.

Вероятностное определение ПРО следует из (2.9) при стремлении интервала наработки $\Delta t \to t_0$ и увеличения объема выборки $N \to \infty$

$$f(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\hat{Q}(t,t+\Delta t)}{\Delta t}=\frac{dQ(t)}{dt} \quad (2.10)$$

ПРО по существу является плотностью распределения (плотностью вероятности) случайной величины *T* наработки объекта до отказа. Поскольку *Q(t)* является неубывающей функцией своего аргумента, то $f(t) \geq 0$. Один из возможных видов графика *f(t)* приведен на Рис. 2.3.

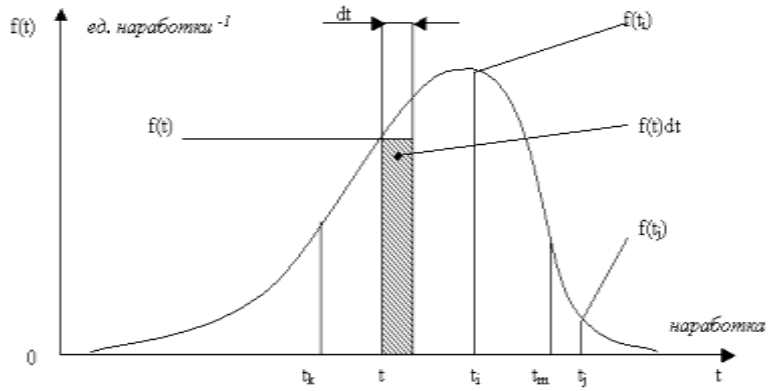

Рис. 2.3. Плотность распределения отказов в зависимости от наработки

Вероятность того, что отказ случится в интервале *[t, t + dt]* равна:

$$B\{T \in (t, t+dt)\} = B\{t < T < t+dt\} \approx f(t)dt \qquad (2.11)$$

где *f(t)dt* – элемент ВО объекта в интервале *[t, t + dt]* (геометрически это площадь заштрихованного прямоугольника, опирающегося на отрезок *dt*).
Отсюда:

$$B\{T \in (t_k, t_m)\} \approx \sum_{t_k}^{t_m} f(t_i)dt_i \approx \int_{t_k}^{t_m} f(t)dt \qquad (2.12)$$

что геометрически интерпретируется площадью под кривой *f(t)*, опирающейся на участок $[t_k, t_m]$. ВО и ВБР можно выразить в функции ПРО.
Поскольку $Q(t) = B\{T < t\}$, то используя выражение (2.12), получим:

$$Q(t) = B\{0 < T < t\} = B\{T \in (0, t)\} = \int_o^t f(t)dt \qquad (2.13)$$

расширение интервала слева до нуля вызвано тем, что Т не может быть отрицательной.
Т. к. $P(t) = B\{T \geq t\}$, то

$$P(t) = B\{t \leq T < \infty\} = \int_t^{\infty} f(t)dt \qquad (2.14)$$

Очевидно, что *Q(t)* представляет собой площадь под кривой *f(t)* слева от *t*, а *P(t)* – площадь под *f(t)* справа от *t*. Поскольку все, полученные при испытаниях значения наработок лежат под кривой *f(t)*, то

$$\int_0^{\infty} f(t)dt = \int_0^t f(t)dt + \int_t^{\infty} f(t)dt = Q(t) + P(t) = 1. \qquad (2.15)$$

Интенсивность отказов (ИО)
Статистическая оценка ИО определяется

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t+\Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \text{ [ед.наработки}^{-1}\text{]} \qquad (2.16)$$

отношением числа объектов $\Delta n(t, t + \Delta t)$, отказавших в интервале наработки $[t, t + \Delta t]$ к произведению числа *N(t)* работоспособных объектов в момент *t* на длительность интервала наработки Δt. Сравнивая (2.8) и (2.16) можно отметить, что ИО несколько полнее характеризует надежность объекта на момент наработки *t*, т. к. показывает частоту отказов, отнесенную к фактически работоспособному числу объектов на момент наработки *t*. Вероятностное определение ИО получим, умножив и поделив правую часть выражения (2.16) на *N*

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t+\Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \cdot \frac{N}{N} = \frac{\Delta n(t, t+\Delta t)}{N \cdot \Delta t} \cdot \frac{N}{N(t)}. \qquad (2.17)$$

С учетом (2.9), оценку ИО $\hat{\lambda}(t)$ можно представить:

$$\hat{\lambda}(t)=\frac{\hat{Q}(t,t+\Delta t)}{\Delta t}\cdot\frac{1}{\hat{P}(t)} \qquad (2.18)$$

откуда при стремлении $\Delta t \to 0$ и $N \to \infty$ получаем

$$\lambda(t)=\frac{dQ(t)}{dt}\cdot\frac{1}{P(t)}=\frac{f(t)}{P(t)} \qquad (2.19)$$

2.3. Связи показателей надежности. Характеристики безотказности

Уравнение связи показателей надежности

Поскольку интенсивность отказов $\lambda(t)$ является более полной характеристикой надежности, представляет интерес выразить $P(t)$ через $\lambda(t)$. Используя выражение для интенсивности отказов

$$\lambda(t)= f(t)/P(t) \qquad (2.20)$$

запишем

$$dP(t)/dt = -\lambda(t)\cdot P(t) \qquad (2.21)$$

Разделяя переменные, интегрируя от 0 до t и принимая во внимание, что при $t = 0$ вероятность безотказной работы объекта $P(0) = 1$, получаем

$$\int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)}=\ln P(t)\Big|_0^t=\ln P(t)=-\int_0^t \lambda(t)dt \qquad (2.22)$$

откуда уравнение связи основных показателей надежности имеет вид:

$$P(t)=\exp\{-\int_0^t \lambda(t)dt\} \qquad (2.23)$$

Величина $\lambda(t)\,dt$ – есть вероятность того, что элемент, безотказно проработавший в интервале наработки $[0, t]$, откажет в интервале $[t, t + dt]$. Уравнение связи показывает, что все показатели надежности $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$ равноправны в том смысле, что зная один из них, можно определить другие.

Числовые характеристики безотказности невосстанавливаемых объектов

Средняя наработка до отказа Рассмотренные выше функциональные показатели надежности $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$ полностью описывают случайную величину наработки $T = \{t\}$. В то же время для решения ряда практических задач надежности бывает достаточно знать некоторые числовые характеристики этой случайной величины и, в первую очередь, *среднюю наработку до отказ*а, которая может быть статистической или вероятностной.

Статистическая оценка средней наработки до отказа определяется по формуле:

$$\hat{T}_0=\frac{1}{N}\sum_1^N t_i \qquad (2.24)$$

где t_i – наработка до отказа i-го объекта.

При *вероятностном определении* средняя наработка до отказа представляет собой *математическое ожидание* случайной величины *T* и определяется:

$$T_0 = M\{T\} = \int_0^\infty t f(t) dt \qquad (2.25)$$

Используя выражение для плотности распределения отказов $f(t) = -\, dP(t)/dt$ и интегрируя по частям, можно преобразовать (2.25) к виду

$$T_0 = \int_0^\infty P(t) dt \qquad (2.26)$$

с учетом того, что *P(0) = 1, P(∞) = 0*.
Из (7) следует, что средняя наработка до отказа геометрически интерпретируется как площадь под кривой *P(t)* (Рис. 2.4). Математическое ожидание (МО) наработки T_0 означает математически ожидаемую наработку до отказа однотипных элементов, т. е. усредненную наработку до первого отказа

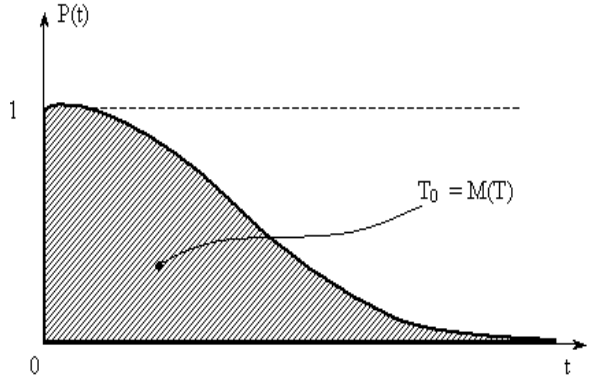

Рис. 2.4 Изменение *P(t)* в зависимости от наработки

Очевидно, что с увеличением выборки испытаний $N \to \infty$ средняя арифметическая наработка (оценка $\hat{T}_0$) сходится к T_0 .На практике также представляют интерес *условные средние наработки*:

- *средняя полезная наработка* $T_0|_{t \le t_1} = \int_0^{t_1} P(t) dt$ определенная при условии, что при достижении наработки t_1 все оставшиеся работоспособными объекты снимаются с эксплуатации;
- *средняя продолжительность предстоящей работы*

$$T_0|_{t>t_1} = M\{T - t_1\} = \frac{1}{P(t_1)} \int_{t_1}^{\infty_1} P(t) dt \qquad (2.27)$$

при условии, что объект безотказно работал на интервале $(0, t_1)$.

Причины использования этих показателей:
1. Высоконадежные объекты (элементы электронных схем), как правило, эксплуатируются меньший срок чем T_0 ($t_{экс} < T_0$), т. е. заменяются по причине морального старения раньше, чем успевают наработать T_0.
2. Часто для указанных объектов сокращают период испытаний (проводят до наработок соответствующих их моральному старению), поэтому T_0 в таком случае понимают как

среднюю наработку, которая имела бы место в действительности, если бы $\lambda(t)$ оставалась такой, какой она была в начальный период испытаний.

Величины $T_0|_{t\le t_1}$, $T_0|_{t>t_1}$ и T_0:связаны между собой по формуле: $T_0|_{t\le t_1} + T_0|_{t>t_1} \cdot P(t_1) = T_0$ Понятия $T_0|_{t\le t_1}$ и $T_0|_{t>t_1}$ иллюстрируются на Рис. 2.5.

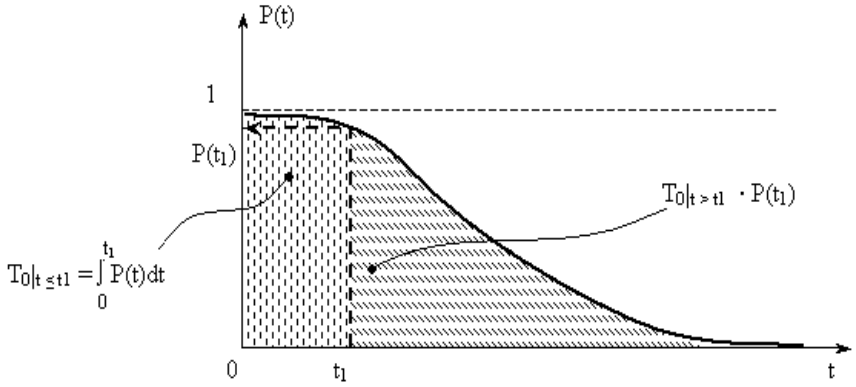

Рис. 2.5. Связь величин $T_0|_{t\le t_1}$ и $T_0|_{t>t_1}$

В то же время средняя наработка не может полностью характеризовать безотказность объекта. Так при равных средних наработках до отказа T_0 надежность объектов 1 и 2 может весьма существенно различаться (Рис. 2.6). Очевидно, что в виду большего рассеивания наработки до отказа (кривая ПРО $f_2(t)$ ниже и шире), объект 2 менее надежен, чем объект 1.Поэтому для оценки надежности объекта по величине $\hat{T}_o$ необходимо еще знать и показатель рассеивания случайной величины $T = \{t\}$, около средней наработки T_0. К числу показателей рассеивания относятся *дисперсия и среднее квадратичное отклонение (СКО) наработки до отказа*.

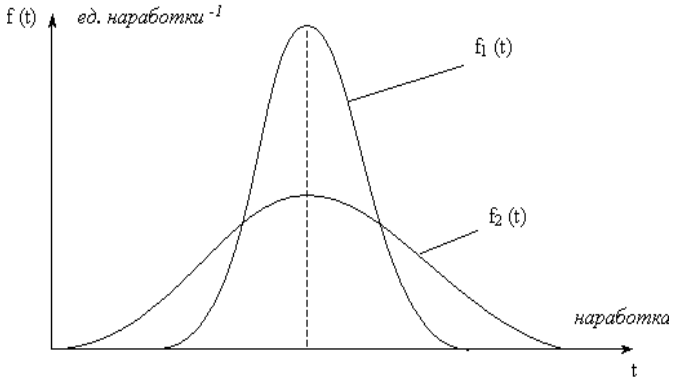

Рис. 2.6 Кривые ПРО $f_1(t)$ и $f_2(t)$ при различных значениях дисперсии

Дисперсия случайной величины наработки:

- статистическая оценка

$$\hat{D} = \frac{1}{N-1}\sum_{1}^{N}\left(t_1 - \hat{T}_0\right)^2 \qquad (2.28)$$

- вероятностное определение

$$D = D\{T\} = M\{(T-T_0)^2\} = \int_0^{\infty}(t-T_0)^2 f(t)dt \qquad (2.29)$$

СКО случайной величины наработки:

$$\widehat{S}^2 = \widehat{D} \quad \text{или} \quad \widehat{S}^2 = \widehat{S}^2\{T\} = D\{T\} \tag{2.30}$$

Средняя наработка до отказа T_0 и СКО наработки S имеют размерность [ед. наработки$^{-1}$], а дисперсия D - [ед. наработки $^{-2}$].

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается понятие надежности как свойства объекта?
2. Перечислите и дайте определения основных состояний и событий, которыми характеризуется надежность?
3. При каких условиях наступает предельное состояние объекта?
4. Какими могут быть объекты по способности к восстановлению работоспособного состояния?
5. Какими могут быть отказы по типу и природе происхождения?
6. Перечислите основные признаки классификации отказов?
7. Перечислите и дайте определение свойств (составляющих) надежности?
8. Дайте определение показателя надежности?
9. Перечислите и поясните показатели долговечности?
10. Перечислите показатели безотказности объекта и поясните, чем отличаются статистическая (выборочные оценки) и вероятностная форма (определения)?
11. Поясните «схему испытаний» объекта при определении выборочных оценок показателей безотказности?
12. Перечислите показатели безотказности объекта и поясните в чем отличия статистических оценок от вероятностной формы их представления?
13. Дайте определение вероятности безотказной работы (ВБР) объекта и поясните ее смысл?
14. Чем отличается ВБР объекта к наработке t от ВБР в интервале наработки $[t, t + \Delta t]$?
15. Дайте определение плотности распределения отказов (ПРО) и поясните ее смысл при оценке надежности объекта?
16. Дайте графическую интерпретацию понятий ВБР и вероятности отказов (ВО)?
17. Дайте определение интенсивности отказов (ИО) и поясните ее смысл при оценке надежности объекта?
18. По результатам испытаний N =100 однотипных элементов определить показатели безотказности для заданных наработок t_i, если известно, что число отказавших элементов $n(t_i)$ к моментам наработки составляет:

t_1 = 100 ч $\quad n(t_1) = 5$
t_2 = 150 ч $\quad n(t_2) = 8$
t_3 = 200 ч $\quad n(t_3) = 11$
t_4 = 250 ч $\quad n(t_4) = 15$
t_5 = 300 ч $\quad n(t_5) = 21$

Построить графики расчетных показателей $\widehat{P}(t)$, $\widehat{Q}(t)$, $\widehat{f}(t)$ и $\widehat{\lambda}(t)$?

19. Поясните смысл уравнения связи показателей безотказности?
20. Дайте определение статистической оценки и вероятностного представления средней наработки до отказа?
21. Перечислите условные средние наработки до отказа и поясните необходимость их использования?
22. Дайте определение статистических оценок и вероятностного представления характеристик рассеивания случайной величины наработки.

ТЕМА 3. МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

3.1. Общие понятия. Статистическая обработка испытаний

Общие понятия о моделях

Для решения задач по оценке надежности и прогнозированию работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель, которая представлена аналитическими выражениями одного из показателей $P(t)$ или $f(t)$ или $\lambda(t)$. Основной путь для получения модели состоит в проведении испытаний, вычислении статистических оценок и их аппроксимации аналитическими функциями. Опыт эксплуатации показывает, что изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$ подавляющего большинства объектов описывается U – образной кривой (Рис. 3.1).

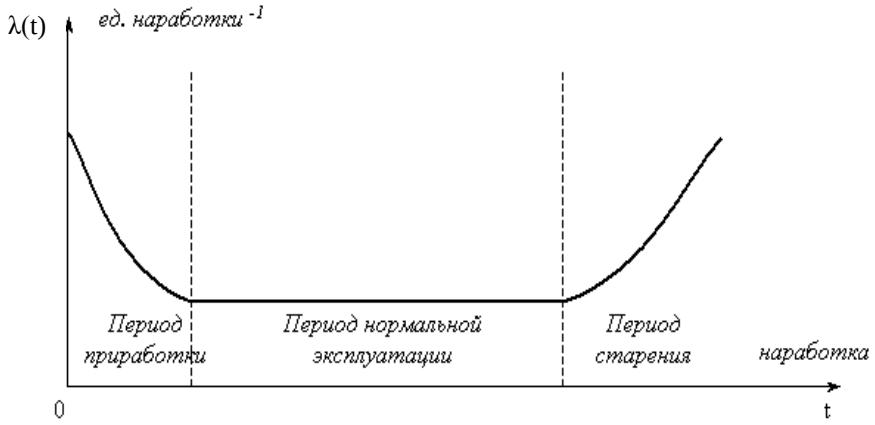

Рис. 3.1. Типичная кривая изменения частоты отказов $\lambda(t)$

Эту кривую можно условно разделить на три характерных участка: период приработки, период нормальной эксплуатации, период старения объекта.

Период приработки объекта имеет повышенную интенсивность отказов (ИО), вызванную приработочными отказами, обусловленными дефектами производства, монтажа, наладки. Иногда с окончанием этого периода связывают гарантийное обслуживание объекта, когда устранение отказов производится изготовителем.

В период *нормальной эксплуатации* ИО уменьшается и практически остается постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего из-за несоблюдения условий эксплуатации, случайных изменений нагрузки, неблагоприятных внешних факторов и т. п. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации объекта.

Возрастание ИО относится к *периоду старения* объекта и вызвано увеличением числа отказов от износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией. Вид аналитической функции, описывающей изменение показателей надежности $P(t)$, $f(t)$ или $\lambda(t)$ определяет закон распределения случайной величины, который выбирается в зависимости от свойств объекта, его условий работы и характера отказов.

Статистическая обработка результатов испытаний и определение показателей надежности

Постановка задачи. Допустим, что по результатам испытаний N невосстанавливаемых одинаковых объектов была получена статистическая выборка – массив наработки (в любых единицах измерения) до отказа каждого из N испытывавшихся объектов. Выборка характеризует случайную величину наработки до

отказа объекта $T = \{t\}$. Необходимо выбрать закон распределения случайной величины T и проверить правильность выбора по соответствующему критерию.

Подбор закона распределения осуществляется на основе аппроксимации (сглаживания) экспериментальных данных о наработке до отказа, которые должны быть представлены в наиболее компактном графическом виде. Выбор той или иной аппроксимирующей функции носит характер гипотезы, которую выдвигает исследователь. Экспериментальные данные могут с большим или меньшим правдоподобием подтверждать или не подтверждать справедливость той или иной гипотезы. Поэтому исследователь должен получить ответ на вопрос: согласуются ли результаты эксперимента с гипотезой о том, что случайная величина наработки подчинена выбранному им закону распределения? Ответ на этот вопрос дается в результате расчета специальных критериев.

Алгоритм обработки результатов и расчета показателей надежности

Формирование статистического ряда. При большом числе испытываемых объектов полученный массив наработок $\{\ldots, t_i, \ldots\}$ является громоздкой и мало наглядной формой записи случайной величины T. Поэтому для компактности и наглядности выборка представляется в графическом изображении статистического ряда – гистограмме наработки до отказа. Для этого необходимо:

- установить интервал наработки $[t_{min}, t_{max}]$ и его длину $\zeta t = t_{\max} - t_{\min}$, где:

$$t_{\min} \le \min\{\ldots, t_i, \ldots\},\ \ t_{\max} \ge \max\{\ldots, t_i, \ldots\};$$

- разбить интервал наработки $[t_{min}, t_{max}]$ на k интервалов равной ширины Δt – шаг гистограммы

$$\Delta t = \frac{\zeta t}{k};\ \ \Delta t = t_{i+1} - t_i = t_i - t_{i-1} \qquad (3.1)$$

- подсчитать частоты появления отказов во всех k интервалах

$$\hat{B}_i = \frac{\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)}{N} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N} \qquad (3.2)$$

где $\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале $\lfloor t_i, t_i + \Delta t \rfloor$.

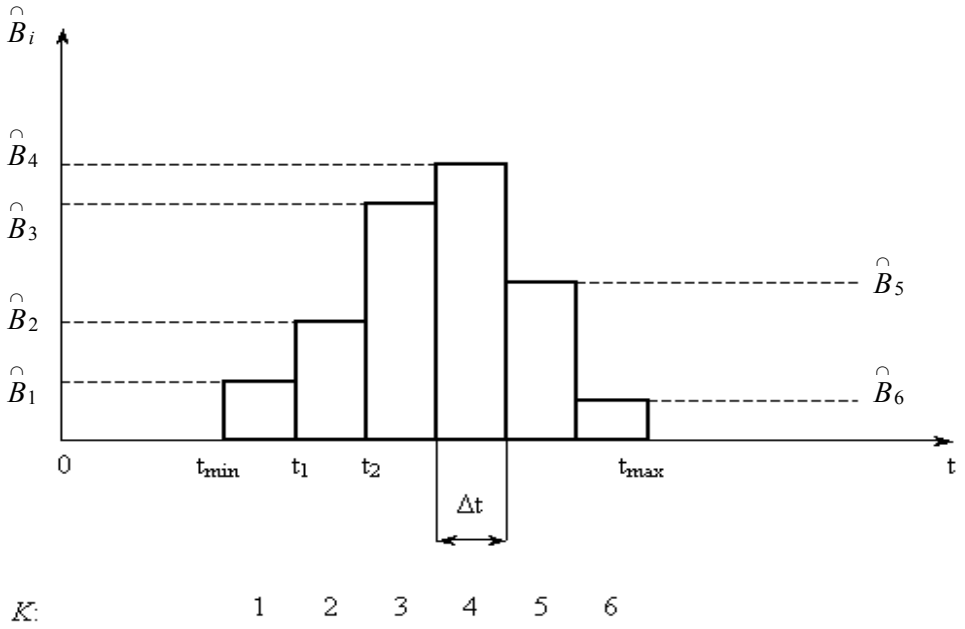

Рис. 3.2. Гистограмма наработки до отказа по результатам испытаний

Очевидно, что: $\sum_{1}^{k} \hat{B}_i = 1$

- полученный статистический ряд представляется в виде гистограммы, которая строится следующим образом. По оси абсцисс *(t)* откладываются интервалы *Δt,* на каждом из которых, как на основании, строится прямоугольник, высота которого пропорциональна (в выбранном масштабе) соответствующей частоте $\hat{B}_i$. Возможный вид гистограммы приведен на Рис. 3.2.

Расчет эмпирических функций. Используя данные сформированного статистического ряда, определяются статистические оценки показателей надежности, т. е. эмпирические функции:

- *функция распределения отказов* (оценка ВО)

$$\hat{Q}(t_{\min}) = \frac{n(t_{\min})}{N} = 0$$

$$\hat{Q}(t_1) = \frac{n(t_1)}{N} = \frac{\Delta n(t_{\min}, t_1)}{N} = \hat{B}_1$$

$$\hat{Q}(t_2) = \frac{n(t_2)}{N} = \frac{\Delta n(t_{\min}, t_1) + \Delta n(t_1, t_2)}{N} = \hat{B}_1 + \hat{B}_2$$

……. (3.3)

$$\hat{Q}(t_{\max}) = \frac{n(t_{\max})}{N} = \sum_{1}^{k} \hat{B}_i = 1$$

- *функция надежности* (оценка ВБР)

$$\hat{P}(t_{\min}) = 1 - \hat{Q}(t_{\min}) = 1$$

… … … … … … … … …

$$\hat{P}(t_{\max}) = 1 - \hat{Q}(t_{\max}) = 0 \qquad (3.4)$$

- *оценка плотности распределения отказов*

$$\hat{f}(t_i) = \frac{\Delta n(t_1, t_{i+1})}{N \cdot \Delta t} = \frac{\hat{B}_i}{\Delta t} \qquad (3.5)$$

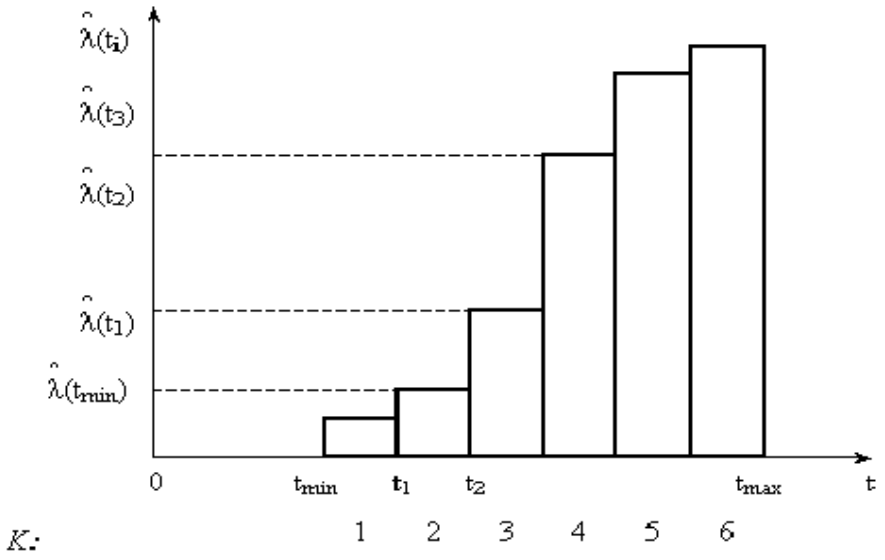

Рис. 3.3. Гистограмма оценки интенсивности отказов

- *оценка интенсивности отказов*

$$\hat{\lambda}(t_i) = \frac{\Delta n(t_1, t_{i+1})}{N(t_i)\cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t_1, t_{i+1})}{[N - n(t_i)]\cdot \Delta t} \qquad (3.6)$$

На Рис. 3.3, приведена гистограмма статистической оценки интенсивности отказов $\hat{\lambda}(t)$. Правила построения графиков ясны из приведенных выше расчетных формул.

Расчет статистических оценок числовых характеристик. Для расчета статистических оценок числовых характеристик можно воспользоваться данными сформированного статистического ряда. Оценки характеристик определяются:
- *средней наработкой до отказа* (статистическое среднее наработки):

$$\hat{T}_0 = \sum_1^k \tilde{t}_i \hat{B}_i \qquad (3.7)$$

- *дисперсией наработки до отказа* (эмпирическая дисперсия наработки):

$$\hat{D} = \sum_1^k \left(\tilde{t}_i - \hat{T}_0\right)^2 \hat{B}_i \qquad (3.8)$$

где $\tilde{t}_i = t_i + \Delta t/2 = t_{i+1} - \Delta t/2$ середина *i*-го интервала наработки, т. е. среднее значение наработки в интервале;

- *средним квадратичным отклонением* $\hat{S} = \sqrt{\hat{D}}$

Целесообразно рассчитать оценки и некоторых вспомогательных характеристик рассеивания случайной величины *T*:
- *выборочный коэффициент асимметрии и выборочный эксцесс наработки до отказа*

$$A = \sum_1^k \left(\tilde{t}_i - \hat{T}_0\right)^3 \hat{B}_i / \hat{S}^3 \qquad E = \left[\sum_1^k \left(\tilde{t}_i - \hat{T}_0\right)^4 \hat{B}_i / \hat{S}^4\right] - 3 \qquad (3.9)$$

Эти характеристики используются для выбора аппроксимирующей функции. Так коэффициент асимметрии является характеристикой «скошенности» распределения, например, если распределение симметрично относительно МО, то *A* = 0. На Рис. 3.4а распределение $f_2(t)$ имеет положительную асимметрию A > 0, а $f_3(t)$ – отрицательную *A* < 0.

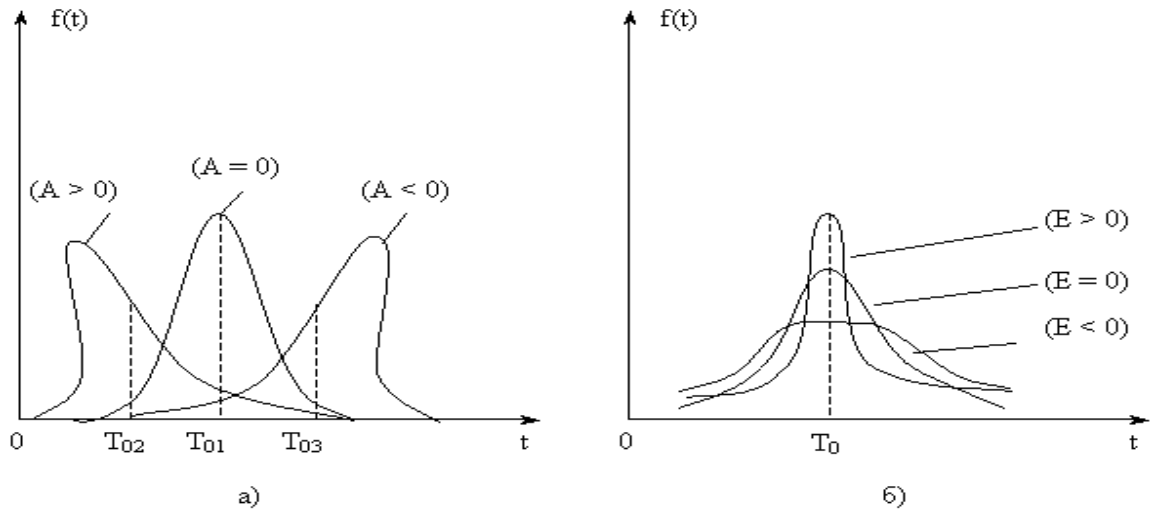

Рис. 3.4. Влияние коэффициента асимметрии и эксцесса на $f(t)$

Эксцесс характеризует «крутость» (остро- или плоско-вершинность) распределения. Для нормального распределения $E = 0$. Кривые *f(t),* более остро-вершинные по сравнению с нормальной, имеют $E > 0$, а наоборот – более плосковершинные, $E < 0$ (Рис. 3.4б).

Выбор закона распределения. состоит в подборе аналитической функции наилучшим образом аппроксимирующей эмпирические функции надежности. В значительной мере, эта процедура является субъективной и зависит от априорных знаний об объекте и его свойствах, условиях работы, а также анализа вида зависимостей $\hat{B}(t), \hat{\lambda}(t)$. Очевидно, что выбор распределения будет зависеть, прежде всего, от вида эмпирической функции $\hat{f}(t)$, а также от вида - $\hat{\lambda}(t)$.

Предположим, что по тем или иным соображениям, выбран гипотетический закон распределения, заданный теоретической зависимостью плотности распределения: $f(t)=\Psi(t,a,b,c,\ldots)$, где *a, b, c, ...* - неизвестные параметры распределения. Требуется подобрать эти параметры так, чтобы функция *f(t)* наилучшим образом сглаживала ступенчатый график $\hat{f}(t)$. При этом используется следующий прием: параметры *a, b, c* и др. выбираются с таким расчетом, чтобы несколько важнейших числовых характеристик теоретического распределения были равны соответствующим статистическим оценкам.

На графике вместе с $\hat{f}(t)$ строится теоретическая ПРО $f(t)$, что позволяет визуально оценить результаты аппроксимации, т.е. расхождение между $\hat{f}(t)$ и $f(t)$. Поскольку эти расхождения неизбежны, то возникает вопрос: объясняются ли они случайными обстоятельствами, или связанны с тем, что теоретическое распределение выбрано ошибочным? Ответ на этот вопрос дает расчет критерия согласия.

Расчет критерия согласия. Этот критерий проверяет гипотезу о том, что случайная величина *T*, представленная своей выборкой, имеет распределение предполагаемого типа. Проверка состоит в следующем. Рассчитывается критерий, как некоторая мера расхождения теоретического и эмпирического распределений, причем эта мера является случайной величиной. Чем больше мера расхождения, тем хуже согласованность эмпирического распределения с теоретическим. При высоком значении этой меры гипотезу о выборе закона распределения следует отвергнуть, как малоправдоподобную. В противном случае экспериментальные данные не противоречат принятому распределению.

Из известных критериев наиболее применяемым является критерий согласия χ^2 (хи-квадрат) Пирсона. Проверка согласованности распределений по этому критерию (для вышеприведенного рассмотрения с отказами) производится следующим образом:
- рассчитываются теоретические частоты появления отказов $B_i = f(\tilde{t}_i)\Delta t$ в интервалах $[t_i, t_i + \Delta t]$;
- рассчитывается критерий χ^2 (мера расхождения)

$$\chi^2 = N\sum_{1}^{k}(\hat{B}_i - B_i)^2 / B_i \qquad (3.10)$$

- определяется число степеней свободы $R = k - L$, где L – число независимых условий, наложенных на частоты $\hat{B}_i$, например:

а) условие $\sum \hat{B}_i = 1$;

б) условие совпадения математических ожиданий $\sum \tilde{t}_i \hat{B}_i = T_0$;

в) условие совпадения дисперсий $\sum(\widetilde{t}_i - \widehat{T}_0)^2 \cdot \widehat{B}_i = D$.

и т. д. Чаще всего $L = 3$.

- по рассчитанным значениям χ^2 и R, используя таблицы распределения Пирсона, определяется вероятность $P\chi$ того, что теоретически выбранное распределение соответствует экспериментальным данным

Ответ на вопрос насколько мала должна быть вероятность $P\chi$, чтобы отбросить гипотезу о выборе того или иного закона распределения – во многом неопределенный. На практике, если $P\chi < 0,1$, то рекомендуется подыскать другой закон распределения. В целом, с помощью критерия согласия, можно опровергнуть выбранную гипотезу, если же $P\chi$ достаточно велика, то это не может служить доказательством правильности гипотезы, а указывает лишь на то, что гипотеза не противоречит данным эксперимента.

3.2. Нормальный закон распределения наработки до отказа

Классическое нормальное распределение

Нормальное распределение или распределение Гаусса является наиболее универсальным, удобным и широко применяемым. Считается, что наработка подчинена нормальному распределению (нормально распределена), если плотность распределения отказов (ПРО) описывается выражением:

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp\left\{ - \frac{(t-a)^2}{2S^2} \right\} \qquad (3.11)$$

где a и S – параметры распределения, соответственно, математического ожидания и среднего квадратичного отклонения, которые по результатам испытаний принимаются: $a \approx \widehat{T}_0$; $S^2 = \widehat{D}$; где $\widehat{T}_0$, $\widehat{D}$ - оценки средней наработки и дисперсии.

Графики изменения показателей безотказности при нормальном распределении приведены на Рис. 3.5. Выясним смысл параметров T_0 и S нормального распределения. Из графика $f(t)$ видно, что T_0 является центром симметрии распределения, поскольку при изменении знака разности (t - T_0) выражение (3.11) не меняется. При $t = T_0$ величина $f(t)$ достигает своего максимума: $f(t)_{\max | \, t=T_0} = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}}$.

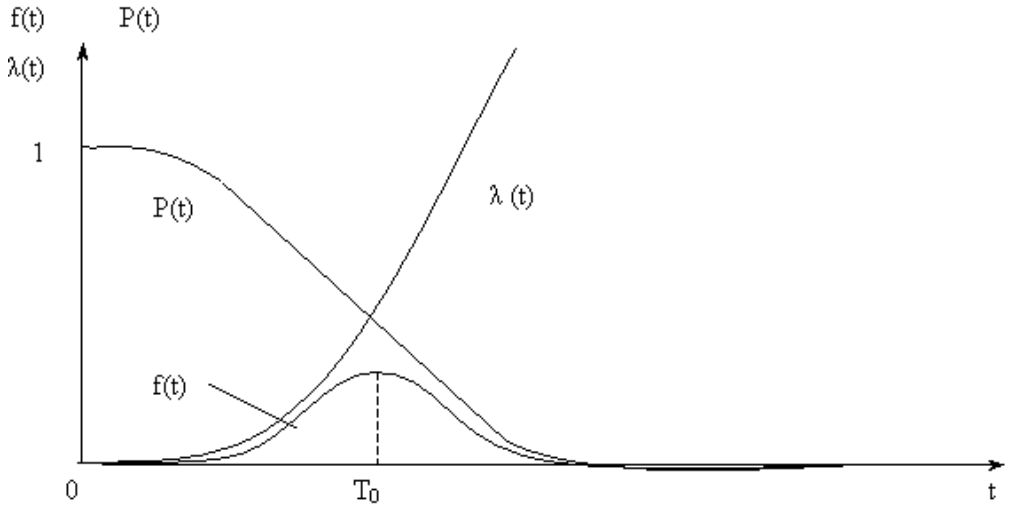

Рис. 3.5. Изменение показателей безотказности при нормальном распределении

При сдвиге T_0 влево/вправо по оси абсцисс, кривая *f(t)* смещается в ту же сторону, не изменяя своей формы. Таким образом, T_0 является центром рассеивания случайной величины *T*, и ее параметр *S* характеризует форму кривой *f(t)*, которая. тем выше и острее, чем меньше *S*. Изменение графиков *P(t)* и *λ(t)* при различных СКО наработок (*S1* < *S2* < *S3*) и T_0 = const приведено на Рис. 3.6.

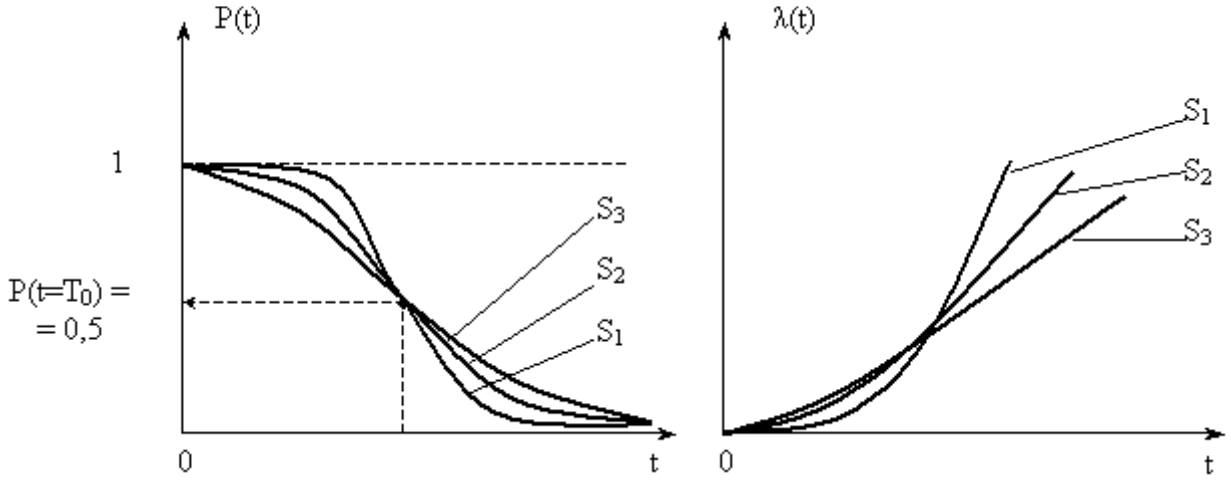

Рис. 3.6. Изменение графиков *P(t)* и *λ(t)* при различных СКО наработок

Используя полученные ранее соотношения между показателями надежности, можно было бы записать выражения для *P(t)*; *Q(t)* и *λ(t)* по известному выражению (3.11) для *f(t)*. Ввиду громоздкости этих интегральных выражений для практического расчета показателей надежности вычисление интегралов заменяется использованием таблиц. С этой целью перейдем от случайной величины *T* к некоей случайной величине

$$x=(t-T_0)/S \qquad (3.12)$$

распределенной нормально с параметрами, соответственно, математического ожидания *M{X} = 0* и среднего квадратичного отклонения *S{X} = 1* при плотности распределения:

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \qquad (3.13)$$

Выражение (3.13) описывает плотность так называемого нормированного нормального распределения. Функция распределения случайной величины *X* запишется:

$$F(x)=\int_{-\infty}^{x} f(x)dx \qquad (3.14)$$

а из симметрии кривой *f(x)* следует, что *f(-x) = f(x)*, откуда *F(-x) = 1 - F(x)* . В справочной литературе приведены расчетные значения функций *f(x)* и *F(x)* для различных $x = (t - T_0)/S$, а также функции Лапласа:

$$\Phi(x)=F(x)-0{,}5 \qquad (3.15)$$

Тогда показатели безотказности объекта для случайной величины *T* определяются через табличные значения *f(x)* и *F(x)* по выражениям:

$$f(t) = f(x)/S; \qquad Q(t) = F(x); \qquad (3.16)$$

$P(t) = 1 - F(x)$; $\lambda(t)=\frac{f(x)}{S(1-F(x))}$ (3.17)

Чаще всего при оценке надежности объекта приходится решать ***прямую задачу***, когда при заданных параметрах T_0 и S нормально распределенной наработки до отказа определяется тот или иной показатель безотказности (например, ВБР) к интересующему значению наработки t. Но в ходе проектных работ приходится решать и ***обратную задачу*** – определение наработки, требуемой по техническому заданию, ВБР объекта. Для решения подобных задач используют *квантили нормированного нормального распределения*, где *квантиль* – это значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности. Обозначим:
t_p– значение наработки, соответствующее вероятности безотказной работы P;
x_p – значение случайной величины X, соответствующее вероятности P.
Тогда из уравнения связи (3.12) x и t при $x = x_p$; $t = t_p$, получаем:

$$t_p = T_0 + x_p S \qquad (3.18)$$

Значения квантилей x_p приводятся в справочной литературе для $P \geq 0{,}5$. При заданной вероятности $P < 0{,}5$ используется соотношение $x_p = - x_{1-p}$. Например, при $P = 0{,}3$ имеем: $x_{0,3} = - x_{1-0,3} = - x_{0,7}$.

Вероятность попадания случайной величины наработки T в заданный интервал $[t_1, t_2]$ наработки определяется:

$$P\{T \in (t_1, t_2)\} = F(x_2) - F(x_1) \qquad (3.19)$$

где $x_1 = (t_1 - T_0)/S$, $x_2 = (t_2 - T_0)/S$.

Отметим, что наработка до отказа всегда положительна, а кривая $f(t)$, в общем случае, начинается от $t = - \infty$ и распространяется до $t = \infty$. Это не является существенным недостатком, если $T_0 >> S$, поскольку по (3.19) нетрудно подсчитать, что вероятность попадания случайной величины T в интервал $P\{T_0 - 3S < T < T_0 + 3S\} \approx$ 1,0 с точностью до 1%. А это означает, что все возможные значения (с погрешностью не выше 1%) нормально распределенной случайной величины с соотношением характеристик $T_0 > 3S$, находятся на участке $T_0 \pm 3S$.

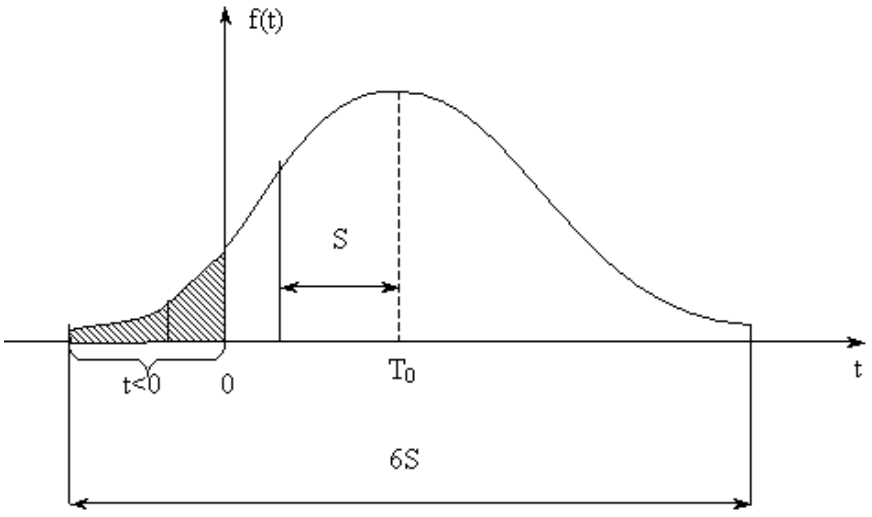

Рис. 3.7. Усеченное нормальное распределение

При большем разбросе значений случайной величины *T* область возможных значений ограничивается слева (*0, ∞*) и тогда используется *усеченное нормальное распределение*. Оно применяется из-за того, что при малых значениях T_0 и большом *S*, может возникать ситуация, когда *f(t)* «покрывает» своей левой ветвью область отрицательных наработок (Рис. 3.7).

Усеченным нормальным распределением называется распределение, получаемое из классического нормального, при ограничении интервала возможных значений наработки до отказа. В общем случае усечение может быть: левым – (0; ∞) или двусторонним – (t_1, t_2).

Рассмотрим усеченное нормальное распределение (УНР) для случая ограничения случайной величины наработки интервалом (t_1, t_2).

Плотность УНР определяется по формуле $\bar{f}(t)=cf(t)$, где *f(t)* вычисляется по соотношению (3.11), а *c* – нормирующий множитель, определяемый из условия, что площадь под кривой $\bar{f}(t)$ равна 1, т. е.:

$$\int_{t_1}^{t_2}\bar{f}(t)dt=\int_{t_1}^{t_2}cf(t)dt=c\int_{t_1}^{t_2}f(t)dt=1 \qquad (3.20)$$

откуда получаем: $c=\dfrac{1}{\int_{t_1}^{t_2}f(t)dt}=\dfrac{1}{F(t_2)-F(t_1)}$.

Применяя переход от случайной величины $T = \{t\}$ к величине $X = \{x\}$: $x_2 = (t_2 - T_0)/S$; $x_1 = (t_1 - T_0)/S$, легко находим, что $c=\dfrac{1}{F(x_2)-F(x_1)}$.

Кривая $\bar{f}(t)$ выше, чем *f(t)*, т. к. площади под кривыми $\bar{f}(t)$ и *f(t)* одинаковы и равны 1 (Рис. 3.8).

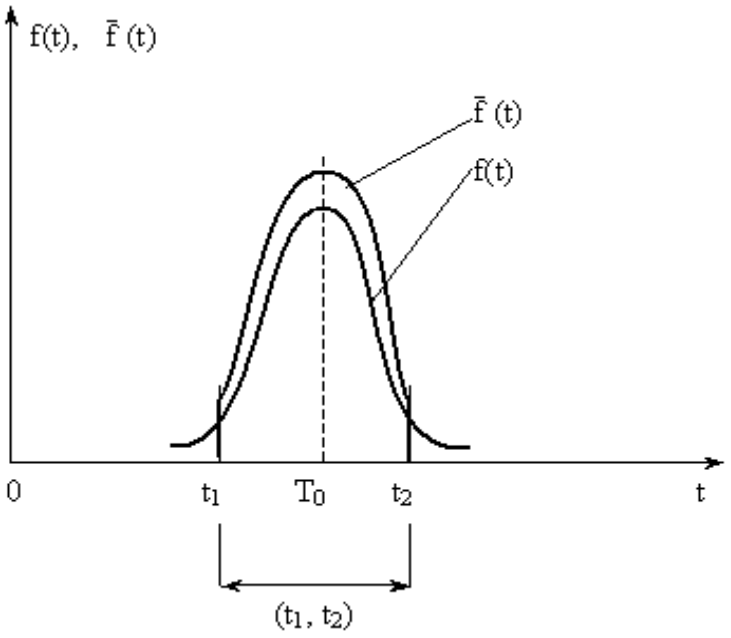

Рис. 3.8. Сравнение усеченного нормального и нормального распределений

Показатели безотказности для УНР в диапазоне (t_1 , t_2) определяются по формулам:

$$\bar{f}(t)=cf(t)=cf(x)/S \quad (3.21)$$

$$\bar{P}(t)=\int_{t}^{t_2} cf(t)dt=c[1-F(x)] \quad (3.22)$$

$$\bar{Q}(t)=cF(x) \quad (3.23)$$

$$\bar{\lambda}(t)=\bar{f}(t)/\bar{P}(t)=\frac{f(x)}{S\cdot(1-F(x))}=\lambda(t) \quad (3.24)$$

УНР для положительной наработки до отказа, т.е. в диапазоне (0; ∞) имеет плотность распределения отказов $\bar{f}(t)=c_0 f(t)$, где c_0 - нормирующий множитель определяется из условия: $c_0\int_0^{\infty} f(t)dt=1$. И далее используются формулы (3.21-3.24), в которые вместо *c* подставляется c_0.

3.3. Законы распределения наработки до отказа

Экспоненциальное распределение

Экспоненциальное распределение описывает наработку до отказа объектов, у которых в результате сдаточных испытаний (выходного контроля) отсутствует период приработки, а назначенный ресурс установлен до окончания периода нормальной эксплуатации. Эти объекты можно отнести к «нестареющим», поскольку они работают только на участке с $\lambda(t) = \lambda = const$. Круг таких объектов широк: сложные технические системы с множеством компонентов, средства вычислительной техники и системы автоматического регулирования и т. п. Экспоненциальное распределение широко применяется для оценки надежности энергетических объектов.

Считается, что случайная величина наработки объекта до отказа подчинена экспоненциальному распределению, если ПРО описывается выражением:

$$f(t) = \alpha\, exp(-\alpha t), \quad (3.25)$$

где α – параметр распределения, который по результатам испытаний принимается равным $\alpha=1/\hat{T}_0$, где $\hat{T}_0$ – оценка средней наработки до отказа. Остальные показатели безотказности при известной *f(t)*, определяются по формулам:

- *вероятность безотказной работы* (ВБР): $P(t) = exp(-\alpha t)$, (3.26)

- *вероятность отказа* (ВО): $Q(t) = 1 - exp(-\alpha t)$, (3.27)

- *интенсивность отказов* (ИО): $\lambda(t) = \alpha\, exp(-\alpha t) / exp(-\alpha t) = \alpha$ (3.28)

Из (3.28) следует, что ИО является постоянной величиной, не зависящей от времени, и обратно пропорциональной оценке средней наработки $\lambda(t)=\lambda=1/\hat{T}_0$.

Числовые характеристики наработки до отказа определяются по формулам:

- *средняя наработка (МО наработки) до отказа*

$$T_0=\int_0^{\infty} P(t)dt=1/\lambda \quad (3.29)$$

- *дисперсия наработки до отказа*

$$D=D\{t\}=\int_0^{\infty}(t-T_0)^2 f(t)dt=1/\lambda^2 \quad (3.30)$$

Рассмотренные далее законы распределения наработки до отказа используются на практике для описания надежности «стареющих» объектов, подверженных износовым отказам.

Логарифмически нормальное (логнормальное) распределение

При логарифмически нормальном распределении нормально распределенным является логарифм ($\lg t$) случайной величины *T*, а не сама эта величина. Логарифмически нормальное распределение во многом более точно, чем нормальное описывает наработку до отказа тех объектов, у которых отказ возникает вследствие усталости, например, подшипников качения, электронных ламп и пр. Если величина $\lg t$ имеет нормальное распределение с параметрами: математическое ожидание *U* и среднеквадратичное отклонение *V*, то величина *T* считается логарифмически нормально распределенной с ПРО, описываемой:

$$f(t)=\frac{1}{V\cdot t\sqrt{2\pi}}\exp\left(-(\lg t-U)^2/2V^2\right) \qquad (3.31)$$

Параметры *U* и *V* по результатам испытаний принимаются:

$$U\approx\widehat{U}=\frac{1}{N}\sum_1^N\lg t_i \qquad (3.32)$$

$$V\approx\widehat{V}=\frac{1}{N-1}\sum_1^N\left(\lg t_i-\widehat{U}\right)^2 \qquad (3.33)$$

где $\widehat{U}$ и $\widehat{V}$ - статистические оценки параметров *U* и *V*.

Показатели надежности можно рассчитать по вышеприведенным выражениям, пользуясь табулированными функциями *f(x)* и, соответственно, *F(x)* и *Ф(x)* для нормального распределения при $x=(\ln t-U)/V$. Графики изменения показателей надежности при логарифмически нормальном распределении приведены на Рис. 3.9. Числовые характеристики наработки до отказа:

- *средняя наработка (МО наработки) до отказа*

$$T_0=\exp\left(U+0.5V^2\right) \qquad (3.34)$$

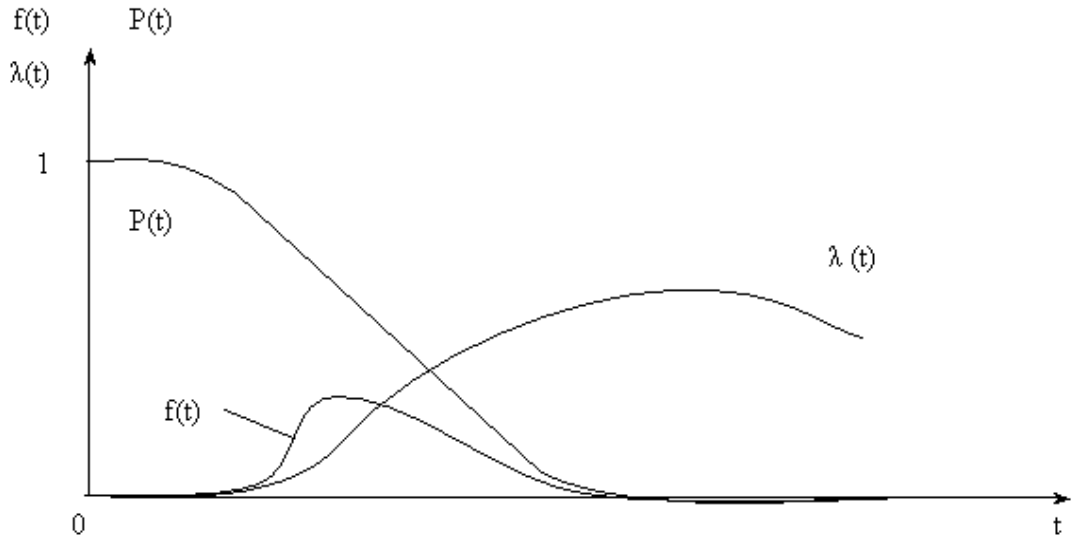

Рис. 3.9. Показатели надежности при логарифмически нормальном распределении

- *дисперсия наработки до отказа*

$$D = D\{T\} = \exp\left(2U + V^2\right) \cdot \left[\exp\left(V^2\right) - 1\right] \qquad (3.35)$$

Гамма–распределение

Случайная величина наработки до отказа T имеет гамма-распределение с параметрами α (масштабный параметр) и β (параметр формы), где $\alpha, \beta > 0$, причем β – целое число, если ее ПРО описывается выражением:

$$f(t) = \frac{\alpha^{\beta} \cdot t^{(\beta-1)}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\alpha t) \qquad (3.36)$$

где $\Gamma(\beta) = (\beta - 1)!$ – гамма-функция Эйлера. Очевидно, что при $\beta = 1$ выражение (3.36) упрощается до вида (3.25), соответствующего экспоненциальному распределению.

Гамма-распределение наиболее хорошо описывает распределение суммы независимых случайных величин, каждая из которых распределена по экспоненциальному закону. При больших β гамма-распределение сходится к нормальному распределению с параметрами: $a = \beta \cdot \alpha \cdot$, $b = \beta \cdot \alpha^2$. Графики изменения показателей надежности при гамма -распределении приведены на Рис. 3.10

Числовые характеристики наработки до отказа являются:

- *средняя наработка (МО наработки) до отказа*

$$T_0 = \beta / \alpha \,, \qquad (3.37)$$

- *дисперсия наработки до отказа:*

$$D = D\{T\} = \beta / \alpha^2 \,. \qquad (3.38)$$

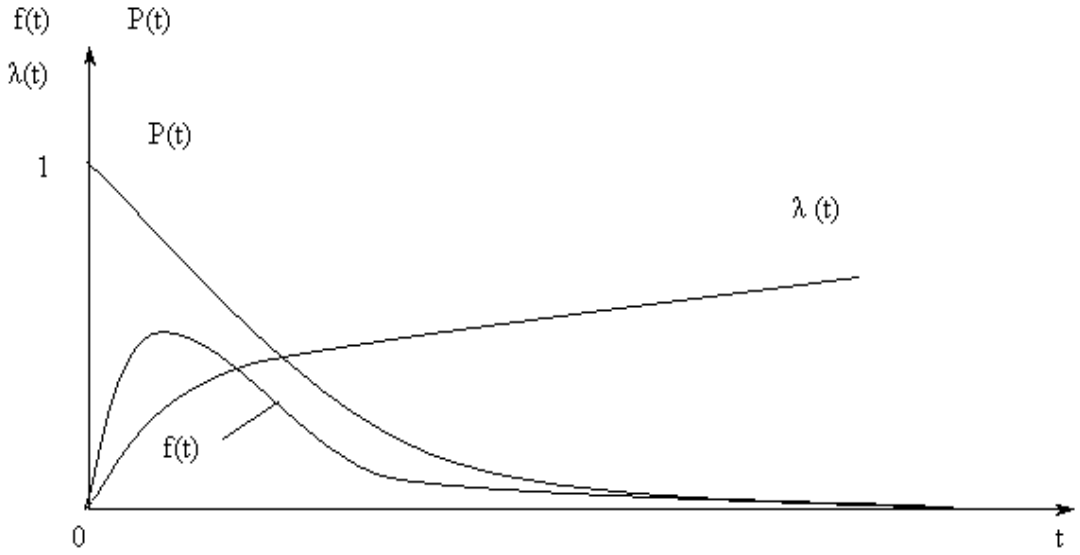

Рис. 3.10. Показатели надежности для гамма-распределения

Помимо рассмотренных законов распределения, в качестве моделей надежности объектов могут использоваться и другие, например: распределение Вейбулла, хорошо описывающее наработку объектов до отказа по усталостным разрушениям, распределение Релея, распределение Эрланга и т. п.

3.4. Надежность систем. Общие понятия и определения

Основы расчета надежности систем. Общие понятия.

Задача расчета надежности систем заключается в определении показателей безотказности системы, состоящей из невосстанавливаемых элементов, по данным о надежности элементов и связях между ними.

Цель расчета надежности систем заключается в:

- обосновании выбора того или иного конструктивного решения;
- выяснении возможности и целесообразности резервирования;
- выяснении возможности достижения требуемой надежности при существующей технологии разработки и производства.

Расчет надежности систем состоит из следующих этапов:

1.*Определение состава рассчитываемых показателей* надежности.

Для системы с невосстанавливаемыми элементами этими показателями являются:

- средняя наработка до отказа (T_{0c});
- ВБР к заданной наработке $P_c(t)$;
- ИО к заданной наработке $\lambda_c(t)$;
- ПРО к заданной наработке $f_c(t)$.

2. *Составление (синтез) структурной логической схемы надежности* (структуры системы), основанное на анализе функционирования системы (какие блоки включены, в чем состоит их работа, перечень свойств исправной системы и т. п.), и выбор метода расчета надежности.

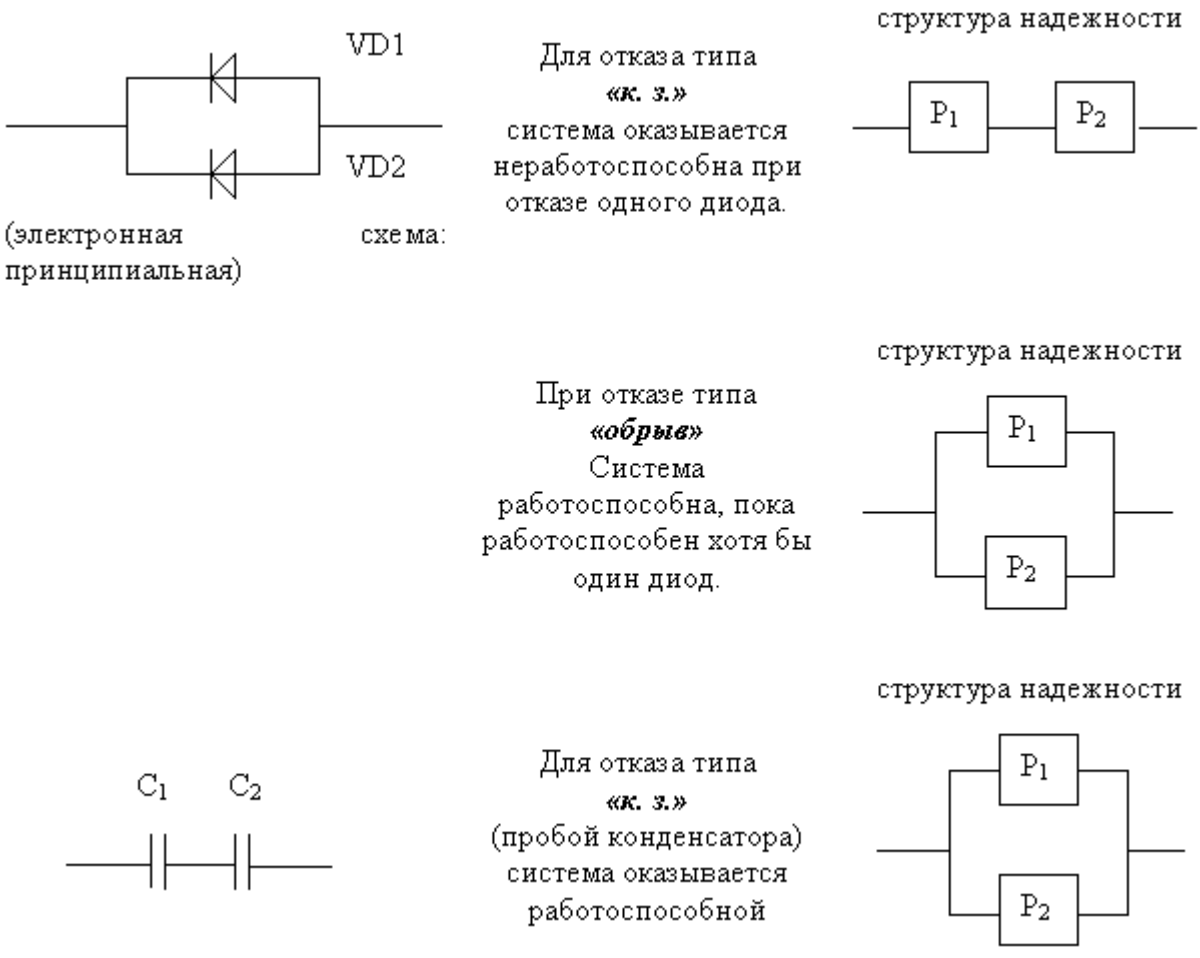

Рис 3.11. Структурные схемы надежности в зависимости от вида отказа элементов

Структура системы – это логическая схема взаимодействия элементов, определяющая работоспособность системы или иначе графическое отображение элементов системы, позволяющее однозначно определить работоспособность системы по состоянию работоспособности элементов.

По структуре системы могут быть:

- система без резервирования (основная система);
- системы с резервированием.

Для одних и тех же систем могут быть составлены различные структурные схемы надежности в зависимости от вида отказов элементов (см. Рис. 3.11).

3. *Составление математической модели,* связывающей рассчитываемые показатели системы с показателями надежности элементов. Эти модели могут быть реализованы с помощью:

- интегральных и дифференциальных уравнений;
- на основе графа возможных состояний системы;
- на основе логико-вероятностных методов;
- на основе дедуктивного метода (дерево отказов).

4. *Выполнение расчета, анализ результатов, корректировка расчетной модели.*

Практически расчет надежности производится в несколько приближений:

А. На стадии составления технического задания на проектируемую систему, когда ее структура не определена, производится предварительная оценка надежности, исходя из априорной информации о надежности близких по характеру систем и надежности комплектующих элементов.

Б. Составляется структурная схема с показателями надежности элементов, заданными при нормальных (номинальных) условиях эксплуатации.

В. Окончательный (коэффициентный) расчет надежности проводится на стадии завершения технического проекта, когда произведена эксплуатация опытных образцов и известны все возможные условия эксплуатации. При этом: корректируются показатели надежности элементов, (часто в сторону их уменьшения) вносятся изменения в структуру (например, выбирается резервирование).

Системы с резервированием. Общие понятия.

Работоспособность систем без резервирования требует обеспечения работоспособности всех элементов системы. В сложных технических устройствах без резервирования никогда не удается достичь высокой надежности даже, если использовать элементы с высокими показателями безотказности.

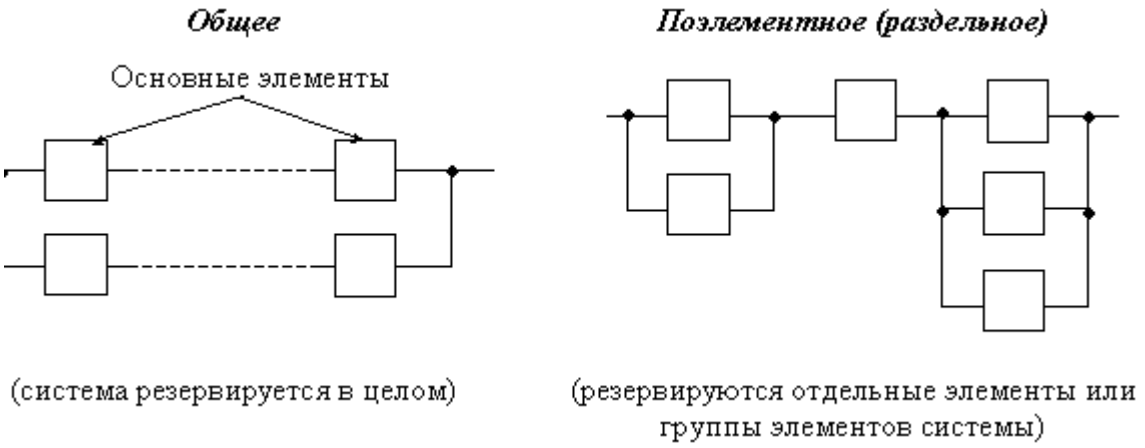

Рис 3.12. Способы структурного резервирования

Система с резервированием – это система с избыточностью элементов, т. е. с резервными составляющими, избыточными по отношению к минимально необходимой (основной) структуре и выполняющими те же функции, что и основные элементы. В системах с резервированием работоспособность обеспечивается до тех пор, пока для замены отказавших основных элементов имеются в наличии резервные.

Структурное резервирование может быть общее и поэлементное (Рис 3.12):

По виду резервирование подразделяют на:

пассивное (нагруженное) – резервные элементы функционируют наравне с основными (постоянно включены в работу);

активное (ненагруженное) – резервные элементы вводятся в работу только после отказа основных элементов (резервирование замещением).

При *нагруженном резервировании* резервные элементы расходуют свой ресурс, имеют одинаковое распределение наработок до отказа и интенсивность отказов основных λ_0 и резервных $\lambda_н$ элементов одинакова ($\lambda_0 = \lambda_н$). Различие между основными и резервными элементами часто условное. Для обеспечения нормальной работы (сохранения работоспособности) необходимо, чтобы число работоспособных элементов не становилось меньше минимально необходимого. Разновидностью нагруженного резервирования является *резервирование с облегченным резервом,* т. е. резервные элементы также находятся под нагрузкой, но меньшей, чем основные. Интенсивность отказов резервных элементов $\lambda_{об}$ ниже, чем у основных, т. е. $\lambda_0 > \lambda_{об}$.

При *ненагруженном резервировании* (Рис. 3.13) резервные элементы не подвергаются нагрузке, их показатели надежности не изменяются и они не могут отказать за время нахождения в резерве, т. е. интенсивность отказов резервных элементов $\lambda_x = 0$. Резервные элементы включаются в работу только после отказа основных элементов. Переключение производится вручную или автоматически (автоматически – включение резервных машин и элементов в энергетике, в бортовых сетях судов и самолетов и т. д.; вручную – замена инструмента или оснастки при производстве, включение эскалаторов в метро в часы «пик» и т. д.).

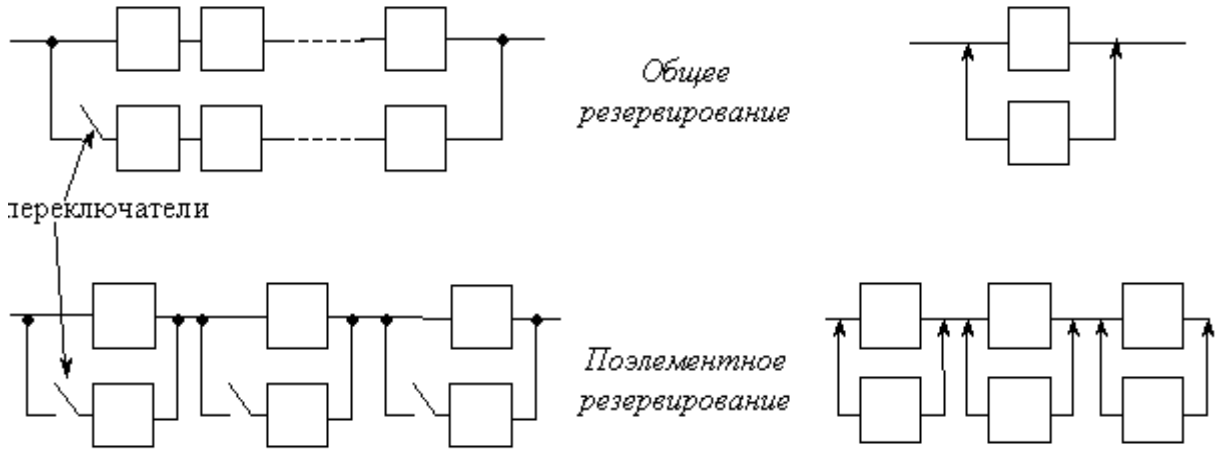

Рис 3.13. Примеры ненагруженного резервирования

Разновидностью ненагруженного резервирования является *скользящее резервирование*, когда один и тот же резервный элемент может быть использован для замены любого из элементов основной системы.

Если рассмотреть два характерных вида резервирования, то очевидно, что при равенстве числа основных и резервных элементов ненагруженный резерв обеспечивает большую надежность. Но это справедливо только тогда, когда перевод резервного элемента в работу происходит абсолютно надежно (т. е. ВБР переключателя должна

быть равна 1,0). Выполнение этого условия может быть связано со значительными техническими трудностями или является иногда нецелесообразным по экономическим или техническим причинам.

Кратность резервирования – это соотношение между общим числом однотипных элементов и элементов, необходимых для работы системы: $k = (n - r)/r$. где n – число однотипных элементов в системе; r – число элементов, необходимых для функционирования системы. Кратность резервирования может быть целой, если $r = 1$, или дробной, если $r > 1$. Например, для способа резервирования, приведенного на Рис.3.14, имеем $r = 1$; $k = (3-1)/1 = 2$.

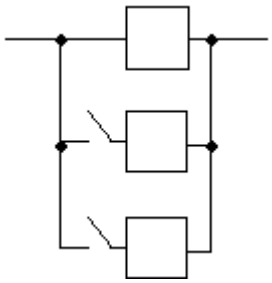

Рис 3.14. Примеры кратного резервирования

3.5. Надежность основной системы

Определяющие соотношения

Основные системы (ОС) являются простейшими техническими системами, в которых отказ одного элемента приводит к отказу всей системы. Работоспособность основной системы обеспечивается при условии, когда все n элементов системы находятся в работоспособном состоянии (Рис. 3.15).

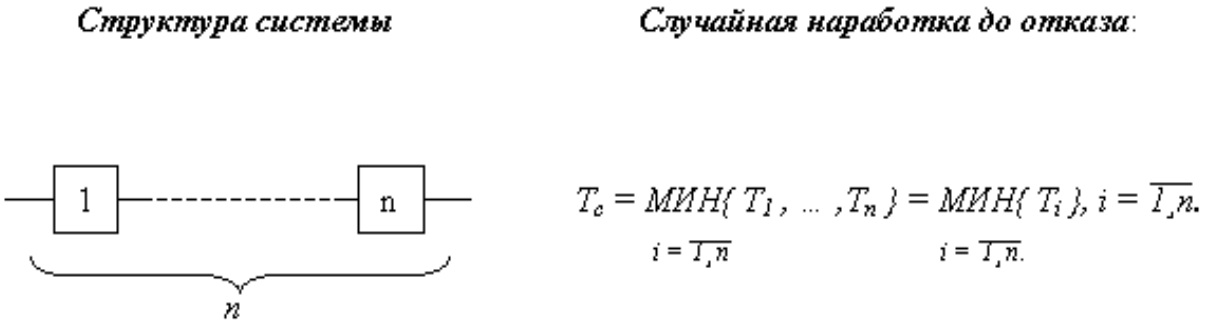

Рис 3.15. Основная система: условие работоспособности

Поскольку события, заключающиеся в работоспособности элементов, являются независимыми, то:

- вероятность безотказной работы ОС:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot \ldots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t) \qquad (3.39)$$

- вероятность отказа (ВО) основной системы (ОС):

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} P_i(t) \qquad (3.40)$$

При идентичных элементах ОС: $P_1(t) = ... = P_n(t) = P(t)$, тогда:

- вероятность безотказной работы: $P_c(t) = P^n(t)$;

- вероятность отказа: $Q_c(t) = 1 - P^n(t)$.

Поскольку на участке нормальной эксплуатации наработку до отказа можно описать экспоненциальным распределением каждого элемента

$$P_i(t) = exp(-\lambda_i \cdot t), \tag{3.41}$$

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} P_i(t) \tag{3.42}$$

где λ_i = const, то вероятность безотказной работы ОС определяется по формуле:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^{n} \exp(-\lambda_i \cdot t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot t \right) \tag{3.43}$$

Отсюда, полагая $P_c(t) = \exp(-\lambda_c \cdot t)$ получаем, что интенсивность отказов ОС равна сумме интенсивностей отказов элементов

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{3.44}$$

В общем случае, для любого распределения наработки интенсивность отказов системы равна:

$$\lambda_c(t) = \lambda_1(t) + \ldots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t) \tag{3.45}$$

отсюда для n идентичных элементов $\lambda_i(t) = \ldots = \lambda_n(t) = \lambda(t)$ получим:

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda(t) = n\ \lambda(t) \tag{3.46}$$

Если λ_i не меняется со временем ($\lambda_i = const$) то при экспоненциальном распределении наработки до отказа каждого элемента $P_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, показатели безотказности ОС определяются для:

- вероятность безотказной работы и вероятность отказа:

$$P_c(t) = \exp\left(-t \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \right) = \exp(-\cdot \lambda_c t) \qquad Q_c(t) = 1 - \exp(-\lambda_c t) \tag{3.47}$$

- интенсивность отказа и МО наработки до отказа:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \qquad T_{0c} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} 1/T_{0i}} \tag{3.48}$$

Плотность распределения отказов:

$$f_c(t) = - d\ P_c(t)/ dt = \lambda_c\ exp(-\lambda_c \cdot t); \tag{3.49}$$

Таким образом, при экспоненциальной наработке до отказа каждого из n элементов, распределение наработки до отказа ОС также подчиняется экспоненциальному распределению. Для ОС надежность меньше надежности каждого из элементов. С увеличением числа элементов надежность ОС уменьшается. Например,

при n = 1000, $P_i(t)$ = 0,99, $P_c(t) < 10^{-4}$ и средняя наработка до отказа системы в 1000 раз меньше средней наработки каждого из элементов.

Распределение норм надежности основной системы по элементам

Рассмотренные модели позволяют определить показатели безотказности ОС по известным показателям надежности элементов – так решается задача при завершении технического проекта, после испытаний опытных образцов системы и составляющих элементов. Для этого случая: значения $P_i(t)$ i–тых элементов хорошо известны и значение $P_c(t)$ лишь уточняется и сравнивается с заданным в ТЗ на проект. При этом, если $P_c(t)$ получается меньшей, чем в ТЗ, то принимаются меры по ее повышению (резервирование, использование более надежных элементов и т. п.).

Но на начальной стадии проектирования в ТЗ указывается лишь ВБР проектируемой системы и тогда при проектировании используются как элементы с известной надежностью, так и элементы, о надежности которых можно судить лишь по их аналогам (прототипам). При этом необходима предварительная оценка надежности элементов, которая, в дальнейшем, уточняется в ходе испытания опытных образцов системы и элементов. В этой ситуации применяются различные способы распределения норм надежности и выбор того или иного способа зависит от имеющейся информации о проектируемой системе. Среди них можно отметить следующие:

1. Распределение надежности по принципу равнонадежности элементов:

Здесь обычно по техническому заданию заданы $P_c(t)$, n – число элементов системы и принимается, что распределение наработки до отказа элементов – экспоненциальное. Тогда при идентичных (равнонадежных) элементах ($\lambda_1 = \ldots = \lambda_i = \ldots = \lambda_n = \lambda$) интенсивность отказа i–го элемента:

$$\lambda_i = \frac{1}{n}\left(-\ln P_c(t)/t\right) \qquad (3.50)$$

2. Распределение надежности с учетом данных о надежности аналогов.

Здесь по техническому заданию заданы: $P_c(t)$, n – число элементов системы и интенсивности отказов аналогов – λ_{ai}, $i = 1, \ldots, n$.Сначала определяется доля отказов системы из-за отказов i–го элемента:

$$k_i = \lambda_{ai} / \lambda_{ac} \qquad (3.51)$$

где $\lambda_{ac} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ai}$ - интенсивность отказов системы по данным об аналогах.

Далее определяется ИО проектируемой системы: $\lambda_c = -\ln P_c(t)/t$ и требуемая интенсивность отказов составляющих элементов: $\lambda_i = k_i \lambda_c$.

3.Распределение надежности с учетом перспектив совершенствования элементов.

Здесь по техническому заданию заданы $P_c(t)$, n – число элементов системы, а также изменение ИО аналогов за временной период [τ = 19XY по 200Z годы], аппроксимированное выражением:

$$\lambda_{ai\tau} = \varphi(\lambda_{ai}, 19XY, \tau), \qquad (3.52)$$

где λ_{ai} – - интенсивность отказов i–го аналога в 19XY году.

По этой формуле значение аналога $\lambda_{ai\tau}$ экстраполируется до года проектирования системы (τ_p) откуда получаются: $\lambda_{a1}(\tau_p), \ldots, \lambda_{ai}(\tau_p)$, далее определяется доля отказов системы из-за отказов i–го элемента:

$$k_i = \lambda_{ai}(\tau_p) / \lambda_{ac}(\tau_p), \quad \text{где} \quad \lambda_{ac}(\tau_p) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ai}(\tau_p) \qquad (3.53)$$

и интенсивность отказов элементов системы по формуле $\lambda_i = k_i \lambda_c$ где λ_c определяется по формуле (3.50).

Контрольные вопросы:

1. Что представляет математическая модель, и для каких целей она используется в задачах надежности?
2. Из каких условий выбирается закон распределения наработки до отказа объекта?
3. В чем заключается постановка задачи при испытаниях объектов на надежность?
4. Что представляет собой процедура формирования статистического ряда по результатам испытаний?
5. Какие эмпирические функции рассчитываются при обработке результатов испытаний?
6. В чем заключается выбор закона распределения наработки до отказа по результатам испытаний?
7. Что представляет собой критерий согласия?
8. Объясните, почему распределение Гаусса называется нормальным?
9. Поясните на изменении кривой плотности распределения отказов влияние параметров распределения математического ожидания и дисперсии?
10. Приведите расчетные выражения для показателей безотказности, определенные через табличные функции *f(x), F(x)* и *Φ(x)*?
11. При каких условиях корректно использовать классическое нормальное распределение, и в каких случаях целесообразно применять усеченные нормальные распределения?
12. Приведите расчетные выражения показателей безотказности для усеченного «слева» нормального распределения?
13. Наработка до отказа серийно выпускаемой детали распределена нормально с параметрами: $T_0 = M(T) = 10^4$ час, $S = S(T) = 250$ час. Определить:
1) вероятность того, что при монтаже прибора в него будут поставлены детали, наработка до отказа которых будет находиться в интервале [5000, 9000 час];
2) вероятность того, что при монтаже прибора в него будут поставлены детали, наработка до отказа которых будет находиться в интервале $[T_0 - 3S, T_0 + 3S]$;
3) вероятность того, что безотказно проработав до момента времени 5000 час, деталь безотказно проработает и до 9000 час?
Ответы: 1) 0.00003, 2) 0.9974, 3) 0.99997.
14. Комплектующая деталь, используемая при изготовлении устройства, по данным поставщика этой детали имеет нормальное распределение наработки с параметрами:
$T_0 = 4 \cdot 10^3$ час, $S = 800$ час. Определить интересующую конструктора прибора:
1) наработку до отказа, соответствующую 90% надежности детали;
2) вероятность того, что при монтаже деталь имеет наработку, лежащую в интервале $[2.5 \cdot 10^3, 3 \cdot 10^3]$;
3) вероятность того, что при монтаже деталь имеет наработку, большую, чем $2.5\ 10^3$ час?
Ответы: 1) 2974.4, 2) 0.0755, 3) 0.9699.
15. Как описывается изменение плотности распределения отказов при экспоненциальном распределении наработки до отказа?
16. Получите расчетное выражение для ВБР, ВО и ИО при экспоненциальном распределении наработки до отказа?

17. Как связаны числовые характеристики наработки до отказа с интенсивностью отказов при экспоненциальном распределении наработки до отказа?
18. Для описания надежности каких объектов используется логарифмически-нормальное распределение?
19. Какой из параметров в выражении плотности распределения отказов при гамма-распределении наработки является параметром формы и параметром масштаба?
20. Известно, что серийно выпускаемая деталь имеет экспоненциальное распределение наработки до отказа с параметром $\lambda = 10^{-5}$ час$^{-1}$. Деталь используется конструктором при разработке нового прибора. Назначенный ресурс прибора предполагается $T_н = 10^4$ час. Определить интересующую конструктора:
1) среднюю наработку детали до отказа;
2) вероятность того, что деталь безотказно проработает в интервале наработки $[0, T_н]$;
3) вероятность того, что деталь безотказно проработает в интервале наработки [10^3, 10^4 час]?
Ответы: 1) 10^5 час, 2) 0.905, 3) 0.914.
21. На сборку прибора поступила деталь, прошедшая испытания на надежность. Известно, что наработка до отказа детали подчиняется экспоненциальному распределению с параметром $\lambda = 5\ 10^{-5}$ час$^{-1}$. Определить вероятность того, что при монтаже прибора в него будут поставлены детали, наработка до отказа которых будет находиться в интервале [10^3, 10^4час]?
Ответ: 0.345.
22. Основные цели и задачи расчета показателей надежности систем?
23. Определите состав рассчитываемых показателей безотказности системы?
24. Перечислите и поясните основные этапы расчета надежности систем?
25. Что такое структурная схема надежности?
26. Что такое математическая модель расчета надежности?
27. Какие виды резервирования существуют. В чем отличие нагруженного и ненагруженного резервирования?
28. Что такое кратность резервирования и в чем отличие целой и дробной кратности?
29. Что такое основная система и в чем состоит условие ее безотказной работы?
30. Как определяются показатели безотказности основной системы: ВБР и ИО?
31. Как определяются показатели безотказности основной системы: ПРО и МО наработки до отказа?
32. Какой закон распределения наработки до отказа будет иметь основная система, если законы распределения наработки до отказа элементов являются экспоненциальными (привести доказательство)?
33. В чем заключается необходимость распределения норм надежности между элементами основной системы?
34. Какие существуют способы распределения норм надежности между элементами основной системы, и чем они отличаются?
35. Структура проектируемой системы представляется основной системой, состоящей из 10 элементов «A», 15 элементов «B», 32 элементов «D» и 8 элементов «F». Интенсивности отказов элементов известны и равны: $\lambda_A = 2 \cdot 10^{-6}$ час$^{-1}$, $\lambda_B = 4 \cdot 10^{-6}$ час$^{-1}$, $\lambda_D = 2.5 \cdot 10^{-6}$ час$^{-1}$, $\lambda_F = 5 \cdot 10^{-6}$ час$^{-1}$. Определить среднюю наработку до отказа T_{0c} и ВБР системы за наработки $t_1 = 100$ час, $t_2 = 1000$ час и в интервале указанных наработок? Определить плотность распределения отказов системы при наработке $t_2 = 1000$ час?
Ответ: $T_{0c} = 5 \cdot 10^3$ *час*, $P(t_1) = 0.98$, $P(t_2) = 0.819$, $P_c(t_1, t_2) = 0.836$, $f(t_2) = 1.64 \cdot 10^{-4}$ *час*$^{-1}$

ТЕМА 4. СБОР ИНФОРМАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ

4.1. Методы сбора информации о надежности автомобиля.

Для получения информации о техническом состоянии автомобиля необходимо исходить из уменьшения трудоемкости и стоимости сбора обработки и хранения этой информации. Целесообразно на предприятиях обслуживания автомобилей создать систему хранения информации о транспортных средствах постоянных клиентов. Для этого должна применятся единая система первичной документации, предусматривающая в единой форме учётные документы, правила их заполнения, возможность их обработки на ЭВМ с целью оперативного управления ремонтными работами. Информация о надёжности автомобиля должна обладать следующими свойствами:

- *полнотой,* т.е. достаточностью сведений, необходимых для проведения оценки состояния, анализа надёжности автомобиля, его узлов и агрегатов;
- *достоверностью* информации, что включает объективное отображение условий эксплуатации автомобиля и состояние его элементов. Для этого используют счётчики, тензометрические датчики и другие устройства и приборы, интегрирующие значения нагрузок и характеристик автомобиля и его элементов;
- *однородность*, т.е. выделение событий при появлении неисправности или отказов, их “разнесение” на группы (например, формирование группы отказов только для условий движения автомобиля в городе). Для обеспечения однородности информации необходимо знать сведения о режимах эксплуатации автомобиля и его систем;
- *своевременность* сбора и обработки информации;
- *непрерывность* сбора и анализа информации.

Среди методов сбора информации следует выделить:

- анкетирование случайных владельцев или водителей;
- анкетирование совместно с осмотром автомобиля;
- получение информации при испытании на полигонах;
- эксплуатационное наблюдение за постоянными клиентами;
- испытание в экспериментально - производственных АТП.

Оценка качества этих методов приведена в Таблице 4.1.

Таблица 4.1. Оценка качества методов сбора информации о надежности автомобиля

	Анкетир. случайн	Анкетир. осмотр	Испытан. полигон	Постоян. клиент	Испытан. АТП
Полнота	1	2	3	5	5
Достоверность	1	4	5	5	5
Однородность	1	2	4	4	5
Своевременность	3	4	4	5	5
Непрерывность	1	2	3	4	5
Σ оценок	7	14	19	23	25

Как видно, наименее эффективным методом сбора информации является анкетирование случайных клиентов, а наиболее эффективным - испытание партии автомобилей в экспериментально-производственных АТП.

Анализ причин отказов узлов и деталей показывает, что на их долговечность существенное влияние оказывает:

- совершенство конструкции;
- качество изготовления;
- условие эксплуатации и режимы работы;

Например: сроки службы амортизатора шаровых опор рычагов передней подвески во многом зависят от дорожных условий (ровности дорожного покрытия). На износ кулачков распределительного вала и рычагов привода клапана оказывают влияние, режимы работы двигателя. Ресурс дисков сцепления и деталей тормозной системы главным образом зависит от характера эксплуатации (городские условия, трасса или проселочные дороги) и квалификации водителя. Информация об отказах агрегатах автомобилей постоянно собирается и систематизируется. Например, в Таблице 4.2 приведены соответствующие данные о системах автомобиля ВАЗа.

Таблица 4.2. Распределение отказов по агрегатам и системам автомобиля ВАЗ и связанных с их устранением затрат

Агрегаты и системы	Отказы(%)	Трудоемк. устранения отказов(%)	Стоимость запасных частей(%)
Двигатель и его системы	5,7	11,8	7,4
Сцепление	1,3	4,4	2,7
Коробка передач	0,1	0,1	0,1
Валы карданные	0,7	1,7	1,1
Задний мост	2,4	6,5	11,7
Рулевое управление	1.1	1,1	0,8
Передняя подвеска	16,9	33,8	17,1
Задняя подвеска	7,7	7,7	12,3
Тормозная система	27,2	12,4	10,7
Колеса (без учета шин)	4,0	2,4	3,8
Электрооборуд. и приборы	24,7	10,4	26,6
Кузов и его детали	8,2	7,7	5,7

Для оценки надёжности автомобиля применяют различные подходы, среди которых следует выделить:

- математические методы моделирования и определения надёжности. В этом случае создаются математические модели основных агрегатов и функциональных элементов, которые отражают динамические изменения во времени его характеристик. По достижении этими характеристиками своих предельно допустимых значений определяется ресурс данного агрегата или функционального элемента;
- методы испытаний, среди которых выделяют стендовые испытания, лабораторно-дорожные и полигонные. Однако, наиболее полная и исчерпывающая информация о надёжности автомобиля в целом, и его агрегатов и узлов может быть получена в условиях реальной эксплуатации автомобиля.

Оценка работоспособности двигателя. Эффективность эксплуатации автомобиля во многом зависит от работоспособности двигателя, который является одним из основных, дорогостоящих и трудоёмких узлов автомобиля. Работоспособность двигателя определяется состоянием выходных характеристик в пределах, установленных технической документацией. К числу таких характеристик следует отнести: мощность N_e, крутящий момент M_e, расход топлива G_T, содержание токсичных веществ в отработанных газах, давление масла, рабочая температура двигателя. Для поддержания работоспособности двигателя необходимо располагать информацией:

- о максимально допустимой наработке двигателя, после которой следует проводить ремонт;

- о характере износа основных деталей;
- о номенклатуре деталей, подлежащих ремонту или замене в первую очередь;
- о целесообразных видах ремонта и технического обслуживания двигателя;
- о требуемом объеме запасных частей.

Следует заметить, что для автомобилей разного типа существуют различные подходы для оценки работоспособности двигателя. Наилучшая оценка работоспособности может быть получена в результате анализа множества состояний, в которых находится двигатель в период эксплуатации. Определенные исследования для оценки работоспособности двигателя могут быть выполнены уже на стадии проектирования. Другие исследования производятся экспериментально в процессе наблюдений в период эксплуатации или специально организованных испытаний.

В последнее время в связи с достаточным уровнем развития вычислительной техники производится прогнозирование наработки двигателя до предельного состояния с применением методов модельных испытаний, методов идентификации процессов и характеристик, согласование математических моделей с опытными данными.

При построении моделей идентификации двигателя можно выделить следующие стадии:

- выбор структуры моделей на основании имеющейся априорной информации об исследуемом объекте;
- выбор критерия близости объекта и модели, основанный на специфике задачи;
- определение параметров и коэффициентов моделей на основе выбранного критерия;

Для автомобильного двигателя входными параметрами, определяющими его скоростные и нагрузочные режимы, являются частота вращения коленчатого вала $n_в$ и разрежение во впускном коллекторе $\Delta p_к$, которое часто моделируется углом установки воздушной или дроссельной заслонки.

4.2. Идентификация работы двигателя по результатам стендовых испытаний:

Заключительной фазой производства автомобильного двигателя является его стендовое испытание. Перечень работ и режимы испытаний определяются технологическим процессом для конкретного типа двигателя. При этом следует выделить характерные циклы проведения испытания, к которым следует отнести:

- холодная продувка двигателя, в результате которой необходимо убедиться в том, что нет заеданий при проворачивании коленчатого вала и посторонних шумов;
- запуск двигателя и отладка системы запуска;
- снятие и построение основных рабочих характеристик двигателя, а именно, построение скоростных характеристик: $N_e(n_b)$, $G_T(n_b)$, $M_e(n_b)$, $g_e(n_b)$:
- отладка и регулировка основных рабочих характеристик двигателя;

Подобные характеристики строятся с помощью фиксации некоторых входных параметров: либо угла открытия дроссельной заслонки (частичные и внешние скоростные характеристики, Рис.4.1, 4.2), либо частоты вращения коленчатого вала (нагрузочные характеристики). Недостаток данных характеристик состоит в том, что эти характеристики не дают непрерывной картины изменения показателей по всем направлениям рабочего поля параметров двигателя.

В определенной степени этих недостатков лишены универсальные (многопараметрические) характеристики двигателя, более адекватно описывающие изменение рабочих процессов в двигателе. В качестве координатных входных параметров, как правило, выбирают частоту вращения коленчатого вала (n_b), характеризующую скоростной режим работы двигателя и разрежение в впускном коллекторе трубопровода $\Delta p_к$.

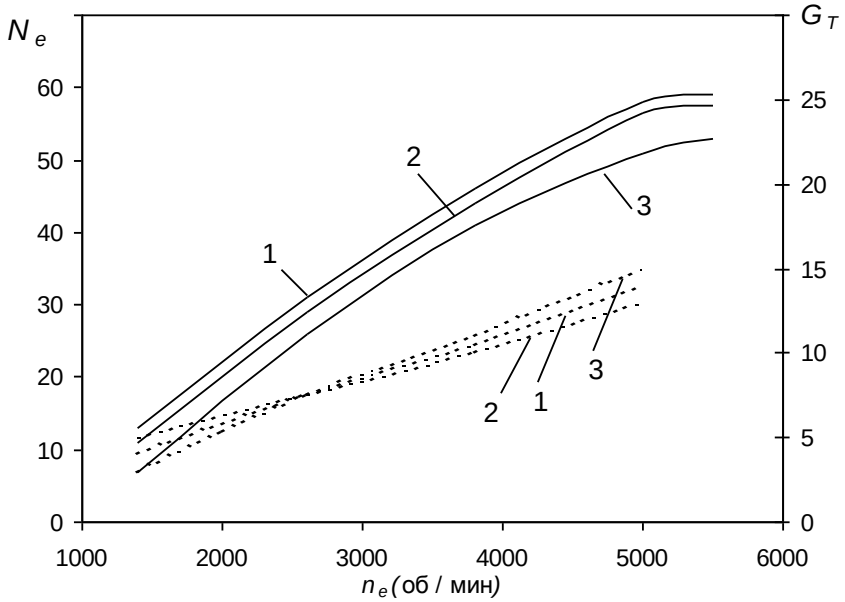

Рис.4.1. Внешние скоростные характеристики двигателя ВАЗ (Δp_k = 5 КПа)
1 – 27 тыс. км; 2 – 68 тыс.км; 3 – 136 тыс. км ; - - - G_T (кг/час); —— N_e (л.с.)

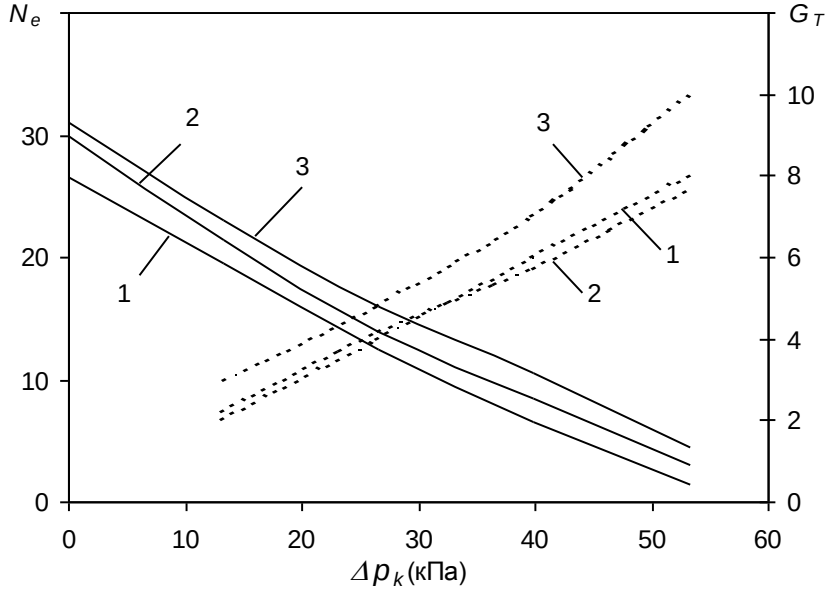

Рис.4.2. Нагрузочные характеристики двигателя ВАЗ (n_e = 2600 об / мин)
1 – 27 тыс.км; 2 – 68 тыс.км; 3 – 136 тыс.км ; - - - G_T (кг/час); —— N_e (л.с.)

Обычно по результатам исследований (например, Волжского и Камского автозаводов) в качестве модели двигателя принимаются следующие зависимости:

$$U_s(n_b, \Delta p_к) = a_{0s} + a_{1s} n_b + a_{2s} \Delta p_к + a_{3s} n_b^2 + a_{4s} (\Delta p_к)^2 + a_{5s} n_b \Delta p_к \qquad (4.1)$$

где U_s – s-ая характеристика автомобильного двигателя.
При разных n_{bi} $i=1,\ldots, n$ и $\Delta p_{кj}$ $j=1,\ldots, m$ полученных по результатам стендовых испытаний формируется матрица $n \times m$ значений:

$$U_s(i, j) = U_s(n_{bi}, \Delta p_{кj}) \qquad (4.2)$$

Используя, как правило, метод наименьших квадратов определяют значения коэффициентов $a_{0s}, a_{1s}, \ldots a_{5s} \equiv a_{ps}(p=0,\ldots,5)$, принимая в качестве критерия минимум значения выражения:

$$Q_s = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left[U_s(i,j) - \left(a_{0s} + a_{1s}n_{bi} + a_{2s}\Delta p_{кj} + a_{3s}n_{bi}^2 + a_{4s}\left(\Delta p_{кj}\right)^2 + a_{5s}n_{bi}\Delta p_{кj}\right)\right]^2 \to \min \quad (4.3)$$

Дифференцируя выражение (4.3) по $a_{ps}(p=0,\ldots,5)$ и приравнивая результирующее выражение к нулю, получаем систему из 6 уравнений:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial a_{ps}} = 0 \qquad p = 0....5 \qquad (4.4)$$

Решая эту систему находим коэффициенты $a_{0s}, a_{1s}, \ldots a_{5s}$, которые, будучи подставлены в уравнение (4.1), будут определять, согласованную с опытными данными *s*-ую характеристику двигателя. Эта характеристика будет отражать одновременно скоростной и нагрузочные режимы работы двигателя.

Естественно, что в процессе эксплуатации данная характеристика будет претерпевать определенные изменения, что отразится на значениях коэффициентов моделей. Таким образом, учитывая, что коэффициенты a_{ps} будут являться функциями от времени или наработки, т.е. $a_{ps} = a_{ps}(\tau)$ или, $a_{ps} = a_{ps}(L)$ можно построить временную рабочую характеристику двигателя, которая будет учитывать изменение рабочих параметров двигателя в процессе наработки. Таким образом, можно построить математическую модель рабочих процессов двигателя, которая является функцией не только параметров $n_b, \Delta p_к$, но также зависит от наработки двигателя. Как правило, данные коэффициенты принимаются линейными функциями времени, т. е.:

$$a_{ps} = a_{ps}(\tau) = a_{ps0} + a_{ps1}\tau \qquad \text{или} \quad a_{ps} = a_{ps}(L) = a_{ps0} + a_{ps1}L \qquad (4.5)$$

Таким образом, зависимость s-ой характеристики двигателя от частоты вращения коленчатого вала, от разрежения в выпускном коллекторе и от наработки примет следующий вид:

$$U_s(n_b, \Delta p_к, L) = a_{0s}(L) + a_{1s}(L)n_b + a_{2s}(L)\Delta p_к + a_{3s}(L)n_b^2 + a_{4s}(L)\Delta p_к{}^2 + a_{5s}(L)n_b\Delta p_к \quad (4.6)$$

Примеры реальных изменений коэффициентов a_{ps} в зависимости от времени для автомобиля ВАЗ приведены в Таблице 4.3. В частности для часового расхода топлива автомобиля ВАЗ при наработке *L* = 68 тыс.км получим

$$G_T(n_b, \Delta p_к) = 0{,}3701 + 2{,}3902\cdot 10^{-3} n_b - 0{,}0655\Delta p_к - 0{,}0153\cdot 10^{-6} n_b^2 +$$

$$+ 0{,}8975\cdot 10^{-3}\left(\Delta p_к\right)^2 - 0{,}0342\cdot 10^{-3} n_b\Delta p_к \qquad (4.7)$$

Таблица 4.3. Коэффициенты a_{ps} для крутящего момента M_e и расхода топлива G_T

	Наработка (тыс км)	a_{0s}	$a_{1s}\cdot10^3$	a_{2s}	$a_{3s}\cdot10^6$	$a_{4s}\cdot10^3$	$a_{5s}\cdot10^3$
Крутящий момент M_e (н·м) s = 1	7	65,630	11,141	-1,301	-1,5561	2,5429	-0,0820
	27	61,262	13,388	-1,454	-1,8440	4,0001	-0,0757
	68	56,236	13,523	-1,284	-1,6382	4,3828	-0,1068
	107	47,007	16,555	-1,453	-1,9633	6,1773	-0,1049
	136	39,887	18,547	-1,275	-2,0945	7,6794	-0,1143
Расход топлива G_T (кг/час) s = 2	7	0,8337	2,3261	-0,0433	0,0539	0,5818	-0,0323
	27	0,3214	2,7720	-0,0492	0,0201	0,7257	-0,0340
	68	0,3701	2,3902	-0,0655	-0,0153	0,8975	-0,0342
	107	-0,1350	3,0764	-0.0516	-0,0831	0,8234	-0,0363
	136	0,2012	3,3253	-0,0675	-0,1370	1,0656	-0,0373

4.3. Моделирование работы двигателя в эксплуатации

Полученные в результате стендовых испытаний характеристики двигателя в неполной мере отражают распределение нагрузочных и скоростных режимов работ двигателя. В практических приложениях принято определять эксплуатационный режим работы двигателя, под которым будем понимать вероятностное распределение значений параметров $n_b, \Delta p_к$ в процессе эксплуатации двигателя. Иначе говоря, необходимо построить некоторую таблицу зависимости относительного времени работы двигателя при эксплуатации от двухмерного распределения параметров $n_b, \Delta p_к$. Для этого:

- выделяют характерные базовые значения $n_{bi}(i=1,\ldots,n),\ \Delta p_{кj}(j=1,\ldots,m)$;
- посредством сбора статистических данных определяют отношение времени работы двигателя на данном режиме ко времени общей наработки двигателя (как правило, это отношение выражают в %).

Таблица 4.4. Распределение времени работы двигателя ВАЗ при движении автомобиля в городе – $f_1(n_{bi}, \Delta p_{кj})$; n_{bi} (об/мин); $\Delta p_{кj}$ (КПа)

$\Delta p_к \backslash n_b$	800	1400	2000	2600	3200	3600	4400	5000	Σ
6,65	0,36	1,74	5,16	4,65	3,48	1,49	0,62	0	17,50
19,95	0,18	1,56	5,01	3,30	1,85	0,73	0,29	0	12,92
33,25	0,11	0,87	3,12	1,89	1,09	0,25	0,11	0	7,44
46,55	0,18	0,69	2,03	2,69	1,23	0,07	0,15	0	7,04
59,85	25,34	1,23	2,4	2,03	1,23	0,025	0,11	0	32,63
73,15	0,36	3,49	7,88	4,68	2,21	0,19	0,04	0,4	18,95
86,45	0	0,15	0,54	1,05	1,31	0,36	0,11	0	3,52
Σ	26,53	9,73	26,13	20,29	12,41	3,45	1,42	0,4	100

+

В сложившейся практике моделирования распределения режимов выделяют *специализированные эксплуатационные режимы двигателя* (СЭРД), которые характеризуют работу двигателя в специально оговоренных условиях:
- только при движении автомобиля в городе (Таблица 4.4);
- только по трассе (Таблица 4.5);
- только по щебёночным покрытиям;
- только по грунтовым дорогам.

Следует заметить, что значения $f_1(n_{bi}, \Delta p_{кj})$ будут существенно отличаться от значений $f_2(n_{bi}, \Delta p_{кj})$. При эксплуатации на трассе двигатель имеет более высокоскоростные режимы работы по сравнению с движением в городском цикле. Анализ распределений специальных эксплуатационных режимов двигателя показывает значительное различие рабочих характеристик двигателя от условий эксплуатации. Волжским автозаводом было собрано достаточно представительная статистика, позволяющая сформировать так называемый *обобщенный эксплуатационный режим* двигателя (ОЭР) реальной эксплуатации автомобиля, который определяется суммой СЭРД с некоторыми весовыми коэффициентами:

$$f_{\text{ОЭР}}(n_b, \Delta p_к) = \sum_q C_q f_{\text{q}}(n_b, \Delta p_к) \qquad (4.8)$$

где C_q – весовые коэффициенты СЭРД

Таблица 4.5. Распределение времени работы двигателя ВАЗ при движении автомобиля по загородным дорогам - $f_2(n_{bi}, \Delta p_{кj})$ (об/мин); $\Delta p_{кj}$ (КПа)

$\Delta p_к \backslash n_b$	800	1400	2000	2600	3200	3600	4400	5000	Σ
6,65	0,14	0,31	1,04	1,78	0,60	0,02	0	0	3,89
19,95	0,08	0,44	3,29	4,87	6,91	4,10	0,15	0	19,84
33,25	0,04	0,41	2,50	4,08	9,72	5,05	0,04	0	21,84
46,55	0,06	0,10	1,57	2,20	8,45	5,24	0,50	0	18,12
59,85	2,13	0,35	1,16	2,11	5,45	2,01	0,27	0	13,48
73,15	1,24	0,81	2,51	2,92	3,62	1,24	0,08	0	12,42
86,45	0	0,31	2,28	3,31	3,52	0,99	0	0	10,41
Σ	3,89	2,73	14,35	21,27	38,27	18,65	1,04	0	100

Весовые коэффициенты вождения автомобиля в европейской части России имеют следующие значения:
- езда в городе $C_1 = 0{,}55$
- трасса $C_2 = 0{,}25$
- дороги с щебеночным покрытием $C_3 = 0{,}15$
- грунтовые дороги $C_4 = 0{,}03$
- горная местность $C_5 = 0{,}02$

Рассмотренные ранее подходы позволяют проводить анализ состояния характеристик двигателя и их изменения в зависимости от наработки по всему рабочему диапазону изменения параметров $n_b, \Delta p_к$. Однако, при этом могут быть упущены из вида характерные для реальных условий эксплуатации зоны рабочего пространства параметров двигателя, что затрудняет оценку его работоспособности. Поэтому анализ результатов стендовых испытаний необходимо проводить с учетом эксплуатационных режимов двигателя. Для этого вводится понятие *интегральной*

характеристики двигателя $J_s(U_s, f_{ОЭР})$, которая представляет собой средне взвешенное значение характеристики $U_s(n_b, \Delta p_к, \tau)$ по времени работы во всем диапазоне изменения $n_b, \Delta p_к$ на обобщенном эксплуатационном режиме. Данную характеристику можно определить интегрированием конкретных характеристик по конкретному диапазону изменений параметров $n_b, \Delta p_к$:

$$J_s(U_s, f_{ОЭР}) = \int_{n_{b\min}}^{n_{b\max}} \int_{\Delta p_{к\min}}^{\Delta p_{к\max}} U_s(n_b, \Delta p_к, L) \cdot f_{ОЭР}(n_b, \Delta p_к) dn_b d(\Delta p_к) \qquad (4.9)$$

Используя интегральные характеристики $J_s(U_s, f_{ОЭР})$ можно определить ресурс двигателя до ремонтных воздействий. Эти характеристики в соответствии с техническими нормами должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$J_s(U_s, f_{ОЭР})_{\min} < J_s(U_s, f_{ОЭР}) < J_s(U_s, f_{ОЭР})_{\max}$$

При этом топливная характеристика G_T ограничивается сверху, а мощность двигателя N_e - снизу. При нарушении данных ограничений двигатель списывается с эксплуатации или отправляется на ремонт. Например, двигатели ВАЗа отправляются на капитальный ремонт, если их мощность, по сравнению с номинальной снижается на 25%, или расход топлива возрастает на 30%, или расход масла увеличивается в несколько раз. При совокупности таких ограничений наработка двигателя до капитального ремонта обычно составляет $L_{пр}(G_T)$ = 158 тыс.км по топливу и $L_{пр}(N_e)$ = 180 тыс.км по мощности, т.е. двигатель, как правило, отправляется в ремонт при достижении высокого расхода топлива, имея запас по мощности.

Контрольные вопросы:

1. Каким требованиям должна удовлетворять информация о надежности автомобиля?
2. Какой метод сбора информации о надежности автомобиля является наиболее эффективным?
3. Какие факторы влияют на долговечность двигателя?
4. Что такое априорная информация?
5. Какие параметры определяют скоростные и нагрузочные режимы автомобильного двигателя?
6. Почему с течением времени (с увеличением наработки) уменьшается мощность двигателя и увеличивается расход топлива?
7. Что такое многопараметрические характеристики двигателя? Для чего они используются?
8. Запишите формулу (4.7) для G_T, используя Таблицу 4.3 при L_1= 7 тыс.км. и L_2= 136тыс.км.?
9. Определите G_T для n_e=2600 об/мин и Δp_k = 30 КПа при L_1= 7 тыс.км. и L_2= 136тыс.км.?
10. Используя Таблицу 4.3, найдите значения a_{ps0}, a_{ps1}(p = 0,1,2,3,4,5) для расхода топлива в интервале наработки ΔL = (68÷107) тыс.км. Определите размерности всех коэффициентов?
11. Используя Таблицу 4.3, найдите значения a_{ps0}, a_{ps1}(p = 0,1,2,3,4,5) для крутящего момента в интервале наработки ΔL = (27÷68) тыс.км. Определите размерности всех коэффициентов?

12. Сравните расходы топлива на режиме n_e = 3000 об/мин и Δp_k = 20 КПа:
- для нового автомобиля (L_1= 7 тыс.км.);
- для автомобиля после длительной эксплуатации (L_2= 136 тыс.км.).

13. При цене 20 руб. за литр топлива определите для 10 часов эксплуатации (при условиях задачи 12) насколько выгоднее ездить на новом автомобиле?

14. Что такое специализированные эксплуатационные режимы двигателя?

15. Каким способом определяются данные для Таблиц 4.4 и 4.5? Почему Таблица 4.4 отличается от Таблицы 4.5?

16. Определите часовой расход топлива при езде в городе, если Δp_k = 20 КПа для нового автомобиля (L_1= 7 тыс.км.), используя Таблицу 4.4?

17. Определите часовой расход топлива при езде по загородным дорогам, если Δp_k = 30 КПа для нового автомобиля (L_1= 7 тыс.км.), используя Таблицу 4.4?

18. Что такое обобщенный эксплуатационный режим? Каким способом определяются весовые коэффициенты C_q?

19. Предполагая, что C_1 = 0,78; C_2 = 0,22; $C_3 = C_4 = C_5 = 0$, определите относительное время работы двигателя на обобщенном эксплуатационном режиме при Δp_k = 73,15КПа для n_e = 800, 1400, 2000, 2600, 3200, 3600, 4400, 5000 (об/мин)?

20. Предполагая, что C_1 = 0,6; C_2 = 0,4; $C_3 = C_4 = C_5 = 0$, определите относительное время работы двигателя на обобщенном эксплуатационном режиме при n_e = 2600об/мин для Δp_k = 6,65; 19,95; 33,25; 46,55; 59,85; 73,15; 86,45КПа?

21. Что такое интегральная характеристика двигателя $J_s(U_s, f_{ОЭР})$? Достаточно ли данных в разделе 4 для того, чтобы определить $J_{G_T}(U_{G_T}, f_{ОЭР})$, если C_1 = 0,5; C_2 = 0,5; $C_3 = C_4 = C_5 = 0$ при: L = 7 тыс.км.; L= 100 тыс.км.; L= 136 тыс.км.?

22. Каким образом вычисляется двойной интеграл в формуле (4.9)?

23. Для каких целей предназначена интегральная характеристика двигателя?

ТЕМА 5. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СРЕДСТВ ОБСЛУЖИВАНИЯ

5.1. Предприятия технического обслуживания и СМО

Типы предприятий технического обслуживания и ремонта автомобилей

Основными предприятиями в системе автосервиса, осуществляющей обслуживание и ремонт автомобилей, являются производственно-транспортные объединения, ремонтные заводы и станции технического обслуживания. Ранее, в Советском Союзе была целая система авторемонтных предприятий, входящих в систему государственного авторемонтного объединения (ГАРО), которая включала в себя заводы по капитальному ремонту автотранспорта, заводы по производству и восстановлению запасных частей и предприятий технического обслуживания. С развитием рыночной экономики данное предприятие было акционировано и распалось на множество акционерных обществ, выполняющих работу по ремонту и техническому обслуживанию. Классификация всех автотранспортных предприятий проводится по их мощности, местоположению, специализации и форм собственности. Например, по принципу расположения автотранспортные предприятия можно разделить на: региональные; городские; дорожные.

В зависимости от объема производства, предприятия технического обслуживания различаются между собой по мощности, под которой в отечественной практике понимается количество рабочих постов. Под рабочим постом понимается автомобильное место, оборудованное подъемником или смотровой ямой, или переносным аппаратом, на котором рабочие выполняют определенный комплекс работ по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей. В отечественной практике наибольшее развитие получили станции технического обслуживания комплексного типа, которые выполняют определенные работы по ремонту автомобилей. Выделяют следующие типы станций:

- *малые*, имеющие до 10 рабочих постов, которые выполняют следующие работы: моечные, диагностические, техническое обслуживание, мелкий и текущий ремонт автомобиля, продажа запасных частей, автомобильных аксессуаров.
- *средние*, имеющие до 20 рабочих мест, которые выполняют те же работы, что и на малых станциях плюс кузовные работы, покрасочные работы, замену агрегатов, обеспечение гарантийного обслуживания, полный спектр работ по диагностике состояния автомобиля и определение остаточного ресурса.
- *крупные*, имеющие до 40 рабочих мест, которые выполняют те же работы, что и на средних станциях; кроме того, на них имеются участки для восстановления агрегатов и узлов; проведения капитального ремонта; при таких станциях технического обслуживания разворачивается предпродажная подготовка и через них осуществляется гарантийная замена автомобиля.
- *дорожные*: (1, 2 рабочих поста), которые предназначены для устранения мелких неисправностей, возникающих в пути. Часто такие станции сооружаются вместе с заправками. Кроме того, к дорожным станциям технического обслуживания следует отнести передвижные рабочие посты, предназначенные для устранения неисправностей транспортных средств.

Системы массового обслуживания. Основные понятия

Предположим, что имеется набор последовательно возникающих заявок, выполнение каждой из которых есть некое действие, осуществляемое специальным устройством - узлом обслуживания. Например, узел обслуживания - это железнодорожная касса, в которую в качестве «заявок на обслуживание» заходят пассажиры за билетами.(Рис. 5.1)

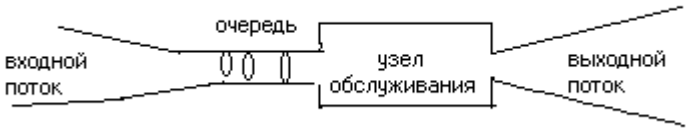

Рис 5.1. Простейшая схема для СМО с одним узлом обслуживания

Это - ситуация *системы массового обслуживания* (СМО), которая имеет две особенности:
- заявки приходят на обслуживание хаотично, в случайные моменты времени;
- время, в течение которого заявка находится в СМО (в очереди и в узле обслуживания) является также случайной величиной.

В промышленности, в сельском хозяйстве, в сфере услуг можно встретить большое разнообразие систем массового обслуживания. Для их описания и моделирования была создана научно-практическая дисциплина «Теория СМО». Некоторые фрагменты этой дисциплины рассмотрены ниже. В частности, будем рассматривать *простейшие потоки* заявок и обслуживания. Простейшие потоки обладают следующими свойствами:
- *стационарность* означает, что среднее число заявок за единицу времени и закономерность поступления заявок зависит лишь от длительности интервала и не зависит от сдвига этого интервала по оси времени;
- *ординарность* означает, что в определенный момент времени в систему не могут поступить 2 заявки одновременно.

Для простейших потоков промежуток времени между последовательно поступающими заявками (будучи величиной случайной) имеет следующую функцию распределения:

$$F(t)=\begin{cases}1-e^{-\lambda t}, & t\ge 0\\ 0, & t<0\end{cases} \qquad (5.1)$$

при некотором $\lambda>0$ и соответствующий поток заявок называется *пуассоновским*.

Время, в течение которого очередная заявка в СМО находится на обслуживании, также является величиной случайной. Если функция распределения этой случайной величины имеет вид:

$$G(t)=\begin{cases}1-e^{-\mu t}, & t\ge 0\\ 0, & t<0\end{cases} \qquad (5.2)$$

при некотором $\mu>0$, то время обслуживания называется *экспоненциальным*.

В пуассоновском потоке заявок при любом режиме обслуживания вероятность поступления *k* заявок за время t равна:

$$P_k(t)=\frac{(\lambda t)^k}{k!}e^{-\lambda t}, \quad k=0,\,1,\,2,\,\ldots. \qquad (5.3)$$

Для этого потока заявок имеется полное описание ряда случайной величины, которая представляет собой число заявок, поступивших за время *t*. Это позволяет подсчитать ее математическое ожидание:

$$M(t)=\sum_{k=0}^{\infty}kP_k(t)=\lambda\cdot t \qquad (5.4)$$

Это значит, что $M(1)=\lambda$. Следовательно, смысл пуассоновского параметра λ в том, что это есть *среднее число заявок, поступающих в единицу времени.* Можно провести аналогичные рассуждения в связи с экспоненциальным временем обслуживания. А именно, если $G(t)=1-e^{-\mu t}$ является функцией распределения времени обслуживания (при неотрицательных значениях *t,* а при отрицательных она равна нулю), то математическое ожидание времени обслуживания есть величина:

$$\int_{-\infty}^{\infty}tG'(t)dt=\frac{1}{\mu}. \qquad (5.5)$$

Следовательно, *среднее время обслуживания одной заявки* равно $t_{обс}=\frac{1}{\mu}$, поэтому в единицу времени (при экспоненциальном обслуживании) в среднем обслуживается μ заявок. Обычно реальные СМО имеют несколько каналов обслуживания и правила обслуживания могут быть различными. Ниже рассмотрим математические модели 2-х типов: СМО с отказами и СМО с ожиданием

5.2. Системы массового обслуживания с отказами

Этот тип СМО характерен для дорожных или небольших станций технического обслуживания. Допустим, что в этой СМО имеется *n* равнодоступных постов обслуживания и действуют два потока:
- входной поток заявок;
- поток освобождения постов (каналов).

Пусть оба потока являются простейшими с интенсивностью соответственно λ и μ.
СМО с отказами характерна тем, что если заявка застает свободным хотя бы один канал, то она принимается к обслуживанию и обслуживается до конца любым из свободных каналов. Если же заявка застает все *n* каналов занятыми, то она получает отказ и покидает систему не обслуженной.
СМО с отказами описывается следующим множеством состояний:
A_0 – все *n* каналов свободны, в системе нет заявок;
A_1 – занят один канал, обслуживается 1 заявка;
……
A_k – занято $k<n$ каналов, обслуживается *k* заявок;
……
A_n – заняты все *n* каналов, обслуживается *n* заявок.
Размеченный граф состояний для СМО с отказами может быть представлен в виде приведенным на Рис. 5.2:

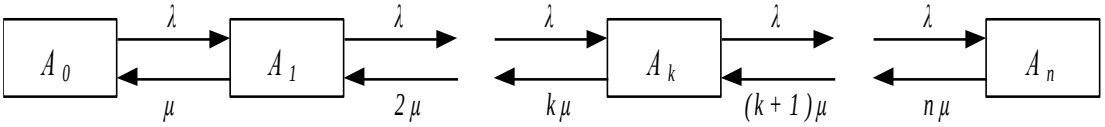

Рис. 5.2. Схема СМО с отказами

Рассмотрим стационарное состояние системы. Поскольку все потоки, действующие в системе, являются простейшими, в системе протекает *марковский* процесс. В этом случае для вывода уравнений процесса можно воспользоваться следующим мнемоническим правилом: алгебраическая сумма слагаемых, каждое из

которых представляет собой произведение вероятности P_k нахождения системы в каком-либо определенном k-ом состоянии на интенсивность потока, переводящего систему в другое состояние, равна нулю. Число слагаемых равно сумме стрелок, входящих и выходящих из состояния A_k, причем для входящих стрелок соответствующее слагаемое берется со знаком плюс, а для выходящих – со знаком минус.

Система алгебраических уравнений, описывающая стационарный режим работы СМО и составленная по графу возможных состояний в соответствии с мнемоническим правилом, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
&-\lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \\
&-(\lambda + 1\cdot\mu)P_1 + \lambda P_0 + (2)\mu P_2 = 0 \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&-(\lambda + k\cdot\mu)P_k + \lambda P_{k-1} + (k+1)\mu P_{k+1} = 0 \qquad k = 1, \ldots, (n-1) \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&-n\mu P_n + \lambda P_{n-1} = 0
\end{aligned} \tag{5.6}$$

К данной системе добавляется очевидное нормировочное условие для вероятностей нахождения СМО в определенных состояниях:

$$\sum_{k=0}^{n} P_k = 1 \tag{5.7}$$

Для решения системы (5.6) введем вспомогательные переменные $z_k = \lambda P_{k-1} - k\mu P_k$ и запишем систему (5.6) в следующем виде:

$$\begin{aligned}
&-z_1 = 0 \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&z_k - z_{k-1} = 0 \qquad k = 1, \ldots, (n-1) \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&z_n = 0
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Однородная система алгебраических уравнений (5.8) имеет нулевое решение $z_k = 0,\ k = 1,\ldots,n$, из которого можно получить следующую рекуррентную формулу: $P_k = \dfrac{\lambda}{\mu k} P_{k-1}$, $k = 1, \ldots, n$. Отсюда:

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot \frac{1}{k!} P_0 \qquad k = 1, \ldots, n \tag{5.9}$$

Используя нормировочное условие (5.7) можно найти, что:

$$P_0 = 1 \Big/ \sum_{k=0}^{n} \frac{1}{k!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \tag{5.10}$$

Подставив (5.10) в (5.9), получим основные расчетные формулы для вероятностей нахождения системы в определенном k-ом состоянии (формулы Эрланга):

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot \frac{1}{k!} \Bigg/ \sum_{s=0}^{n} \frac{1}{s!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s \qquad k = 0, \ldots, n \qquad (5.11)$$

Формулы Эрланга (5.11) дают предельный закон распределения вероятностей числа занятых каналов в зависимости от параметров входного потока заявок λ и потока обслуживания μ. Поведение СМО с отказами в стационарном режиме описывается следующими основными характеристиками:
Вероятность отказа заявке в обслуживании:

$$P_{\text{отк}} = P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot \frac{1}{n!} \Bigg/ \sum_{s=0}^{n} \frac{1}{s!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s \qquad (5.12)$$

Вероятность того, что поступившая заявка будет принята к обслуживанию:

$$P_{\text{обс}} = 1 - P_{\text{отк}} = 1 - P_n \qquad (5.13)$$

Среднее число занятых каналов:

$$N_{\text{з}} = \alpha P_{\text{обс}} = \frac{\lambda}{\mu} P_{\text{обс}} \qquad (5.14)$$

Вероятность того, что занят любой канал:

$$P_{\text{зк}} = \frac{N_з}{n} = \frac{\alpha}{n} P_{\text{обс}} = \frac{\lambda}{n\mu} P_{\text{обс}}$$

Среднее время простоя канала:

$$t_k = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1 - P_{\text{зк}}}{P_{\text{зк}}} \qquad (5.15)$$

Среднее время полной загрузки системы:

$$t_{\text{зс}} = \frac{1}{n\mu} \qquad (5.16)$$

Вероятности состояния системы массового обслуживания с отказами зависят от трех параметров: n, λ, μ. Поэтому выбор местоположения станции технического обслуживания и ее размеры должны быть такими, чтобы вероятность отказа была минимальной. Вероятность простоя станции также должна быть минимальной. Работа станции в основном зависит от параметра λ, который определяется количеством автомобилей в районе обслуживания станции и от параметра μ, который зависит от квалификации работников.

5.3. Система массового обслуживания с ожиданием

Рассмотрим следующую СМО с простейшими потоками заявок λ и обслуживания μ: поступившая заявка может обслуживаться любым свободным каналом; если все n каналов заняты, поступившая заявка становится в очередь и ждет своего обслуживания.

Будем считать, что число мест в очереди неограниченно, причем более ранняя заявка, будет обслуживаться раньше.

Подобные системы называют *СМО с ожиданием*. Они характерны для крупных автоцентров и пунктов оплаты на платных дорогах. В этих системах общее число заявок, находящихся в системе, складывается из обслуживаемых заявок и заявок, находящихся в очереди. Поэтому СМО с ожиданием можно характеризовать следующим бесконечным множеством состояний:

A_0 – все n каналов свободны, в системе нет заявок и нет очереди;

……

A_k – занято $k<n$ каналов, обслуживается k заявок, очереди нет;

…

A_n – заняты все n каналов, обслуживается n заявок, очереди нет.

A_{n+1} – заняты все n каналов, обслуживается n заявок, одна заявка находится в очереди.

…

A_{n+r} – заняты все n каналов, обслуживается n заявок, в очереди находится r заявок.

…

Граф возможных состояний СМО с ожиданием показан на Рис 5.3.

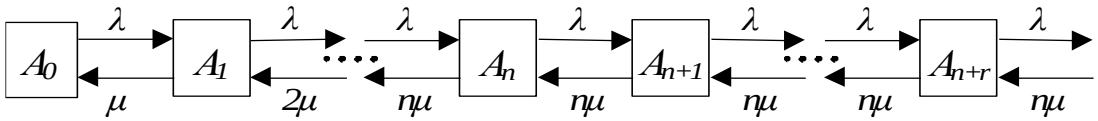

Рис 5.3. Схема СМО с ожиданием (без ограничения очереди)

Стационарное состояние системы описывается бесконечной системой алгебраических уравнений относительно вероятностей P_k и P_{n+r}. Эта система формируется по графу состояний в соответствии с ранее описанным мнемоническим правилом. Система имеет следующий вид:

$$
\begin{aligned}
&-\lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&-(\lambda + k\mu)P_k + (k+1)\mu P_{k+1} + \lambda P_{k-1} = 0, \qquad 1 < k < n \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&-(\lambda + n\mu)P_{n+r} + n\mu P_{n+r+1} + \lambda P_{n+r-1} = 0 \qquad r = 1, \ldots, \infty
\end{aligned}
\tag{5.17}
$$

при нормировочном условии $\sum_{k=0}^{\infty} P_k = 1$.

Первые n уравнений системы (5.17) совпадают с n уравнениями для СМО с отказами и поэтому имеют решение в виде формул Эрланга:

$$P_k = \frac{1}{k!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k P_0 = \frac{\alpha^k}{k!} P_0, \quad 0 < k < n; \qquad \alpha = \frac{\lambda}{\mu}; \tag{5.18}$$

Последние уравнения системы (5.17), начиная с $n+1$, одинаковы по структуре. С помощью вспомогательных переменных

$$z_r = \lambda P_{n+r-1} - \mu n P_{n+r} \tag{5.19}$$

эти уравнения можно записать в виде:

$$z_r - z_{r+1} = 0 \qquad (5.20)$$

откуда имеем:

$$z_{r+1} = z_r = \ldots = 0 \qquad (5.21)$$

Учитывая соотношения (5.19) и (5.21), получим следующую рекуррентную формулу:

$$P_{n+r} = \frac{\lambda}{\mu n} P_{n+r-1} \qquad (5.22)$$

Применяя (5.22) последовательно *r* раз, получим:

$$P_{n+r} = \frac{\lambda^r}{\mu^r n^r} P_n = \frac{\lambda^{n+r}}{\mu^{n+r} n^r n!} P_0 = \frac{\alpha^{n+r}}{n! n^r} P_0 \qquad (5.23)$$

Вероятность P_0 можно найти из нормировочного условия, в которое подставим формулы (5.18) при $0 \le k \le n$ и (5.23) при $r \ge 0$:

$$\sum_{k=0}^{n} P_k + \sum_{r=1}^{\infty} P_{n+r} = P_0 \left[\sum_{k=0}^{n} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k + \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \sum_{r=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{n\mu} \right)^r \right] \qquad (5.24)$$

Обозначим $\rho = \frac{\lambda}{n\mu} = \frac{\alpha}{n}$. Пусть $\rho \le 1$, тогда сумма бесконечно убывающей геометрической прогрессии со знаменателем ρ равна $\sum_{r=1}^{\infty} \rho^r = \frac{\rho}{1-\rho}$. Соотношение (5.24) примет вид:

$$\sum_{k=0}^{n} P_k + \sum_{r=1}^{\infty} P_{n+r} = P_0 \left[\sum_{k=0}^{n} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k + \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \right] \qquad (5.25)$$

Откуда:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{n} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k + \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \cdot \frac{\rho}{1-\rho}} \qquad (5.26)$$

С использованием соотношения (5.25) нетрудно подсчитать основные характеристики СМО с ожиданием в стационарном режиме, которые описываются следующими формулами:

- вероятность того, что все каналы свободны:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{n} \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \cdot \frac{\rho}{1-\rho}} \qquad (5.27)$$

- вероятность того, что все каналы заняты:

$$P_n = \frac{\alpha^n}{n!} P_0 \qquad (28)$$

- вероятность того, что все *n* каналов заняты и *r* заявок находятся в очереди:

$$P_{n+r} = \frac{\alpha^{n+r}}{n! n^r} P_0 \qquad (5.29)$$

- среднее число заявок в очереди:

$$m_r = \sum_{r=1}^{\infty} r P_{n+r} = \frac{\rho}{(1-\rho)^2} P_n \qquad (5.30)$$

- среднее время ожидания заявок в очереди:

$$t_{ож} = \frac{m_r}{\lambda} \qquad (5.31)$$

- среднее число каналов, свободных от обслуживания:

$$N_c = \sum_{k=0}^{n-1} (n-k) \frac{\alpha^k}{k!} P_0 = \sum_{k=0}^{n-1} (n-k) P_k \qquad (5.32)$$

- среднее число каналов, занятых обслуживанием:

$$N_з = n - N_c \qquad (5.33)$$

- коэффициент простоя каналов $K_n = \frac{N_c}{n}$ и коэффициент загрузки каналов: $K_з = \frac{N_з}{n}$.

Параметр λ, как правило, определяется на основе статистических данных и подсчитывается в основном по количеству заявок, поступающих в систему в различные календарные сроки. Значение этого параметра имеет тенденцию возрастать в весеннее время и убывать зимой. Параметр μ определяется техническим оснащением и квалификацией обслуживающего персонала.

Контрольные вопросы

1. Какие типы станций существуют для технического обслуживания автомобилей?
2. Что такое система массового обслуживания? Приведите примеры.
3. Что такое поток заявок и поток обслуживания? Дайте математическое определение простейших потоков.
4. Раскройте смысл пуассоновского параметра λ в потоке заявок.
5. Раскройте смысл параметра μ в потоке обслуживания.
6. Дайте характеристику системе массового обслуживания с отказами.
7. Опишите мнемоническое правило для составления уравнения стационарного режима СМО с отказами.
8. На основе системы (5.6) получите формулу (5.9).
9. Для получения какого соотношения используется уравнение (5.7)?
10. В формуле (5.11) охарактеризуйте смысл каждого символа и индекса.
11. Как получается формула для вероятности отказа в обслуживании?
12. Вывести формулы (5.13) и (5.14).
13. Вывести формулы (5.15) и (5.16).
14. Станция технического обслуживания имеет 4 поста. В среднем в течение часа на станцию для обслуживания прибывает 4 автомобиля, среднее время обслуживания

одного автомобиля на одном посту составляет 40 минут. Если все посты заняты, автомобили уезжают искать новую СТО. Найдите среднее число занятых каналов и вероятность того, что все каналы заняты?

15. Диспетчерская автовокзала предусматривает работу 2-х операторов, каждый оператор обслуживает в среднем 1-го клиента за 1 минуту. В среднем за одну минуту поступает 1,3 заявок. Диспетчерская работает в режиме СМО с отказом. Найти значения $P_0, P_{\text{обс}}, t_{\text{зс}}$:

- если одновременно работают 2 диспетчера;
- если работает только 1 диспетчер.

16. Небольшое кафе имеет 6 индивидуальных столиков для обслуживания. В дневное время в среднем заходят 30 посетителей в час, среднее время нахождения в кафе каждого посетителя 15 минут. Если все столики заняты, посетители уходят не обслуженными. Найти значение $P_0, P_{\text{обс}}$ и вероятность того, что число клиентов, находящихся одновременно в кафе будет не более 4-х? Найти среднее число обслуженных посетителей за 1 час? Если поставить еще один столик, на сколько в течение часа увеличится число обслуженных посетителей?

17. Найти вероятность того, что в условиях задачи 16 в кафе в течение часа зайдут 60 посетителей, а также вероятность того, что за 1 час за одним столиком будет обслужено 6 посетителей?

18. Базируясь на уравнениях (5.17) получить формулы(5.22) и (5.23)?

19. Доказать соотношение (5.26)?

20. Обосновать формулы (5.28) и (5.29)?

21. Доказать формулу (5.30)?

22. Доказать соотношения (5.31) и (5.32)?

23. В порту имеется 6 причалов. Среднее время разгрузки судна на одном причале составляет 0,7 суток. Ежедневно в порт прибывает в среднем 8 судов. Считая поток судов пуассоновским, найти:

- вероятность того, что за сутки прибудут 12 судов?
- вероятность того, что все причалы будут свободными?
- среднее за сутки число обслуженных судов?
- вероятность того, что все причалы будут заняты?
- среднее время ожидания в очереди?
- среднее число ожидающих судов?

24. На пропускном пункте платной автомобильной дороги имеется 6 постов оплаты. Один пост может обслуживать в час в среднем 60 автомобилей. В среднем по этой дороге в час проезжает 240 автомобилей, плата с 1-го автомобиля - 30 рублей. Найти:

- вероятность того, что в течение часа по дороге проедет 400 автомобилей?
- среднюю денежную выручку в час?
- среднее время ожидания автомобиля в очереди?
- вероятность того, что все посты заняты?
- при какой средней интенсивности движения очередь на пункты оплаты начнет неуклонно расти?

ТЕМА 6. УПРАВЛЕНИЕ СТАНЦИЯМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

6.1. Методы принятия инженерных и управленческих решений.

Значительное увеличение парка автомобилей потребовало привлечения в сферу их обслуживания существенных материальных и трудовых ресурсов. В связи с этим возникли следующие задачи:
- размещение, строительство или реконструкция станций технического обслуживания (СТО);
- организация работ по предпродажному и техническому обслуживанию автомобилей, а также по их текущему ремонту в период эксплуатации;
- организация обеспечения СТО запасными частями, горюче-смазочными и другими материалами;
- оснащение СТО оборудованием;
- разработка новых методов организации технического обслуживания и ремонта автомобилей.

Указанные задачи требуют комплексного их решения. При управлении производственной деятельностью СТО применяются экономические производственно-технические и технологические показатели. К группе *экономических показателей* относят те, которые характеризуют производство в целом. К ним следует отнести: экономическую эффективность работы станции, стоимость услуг по техническому обслуживанию и ремонту, зарплату служащих, прибыль предприятия. К *производственно - техническим показателям* следует отнести показатели, которые характеризуют: организацию работ на участках СТО; трудоемкость работ по обслуживанию и ремонту оборудования; технологическое совершенствование оборудования и инструментов (наличие высокотехнологического оборудования и специального инструмента приводит к сокращению трудозатрат при обслуживании и ремонте автомобилей. *Технологические показатели*, как правило, характеризуют виды и объемы технологических операций. Обычно для ремонта автомобиля определенной марки отделом главного конструктора разрабатываются маршрутные технические карты на выполнение операций по обслуживанию и ремонту.
Часть показателей устанавливают на основе нормативных данных, директивных документов и положений, другие показатели определяются на основе статистических исследований.

Для улучшения этих показателей необходимо принимать какие-то управленческие решения. Методы принятия этих решений классифицируются в зависимости от условий принятия решения, имеющейся информации и применяемого аппарата (Рис.6.1).
Процесс принятия решения – это процедура выбора некоторого варианта решения из нескольких альтернативных. Данный процесс складывается из определенных характерных этапов и часто носит итеративный характер. Следует заметить, что в инженерно-технологической службе 75-80% решений приходится на подобные, (т.е. повторяющиеся) производственные ситуации. Решение при этом происходит по следующей схеме:
- анализ рыночной или производственной ситуации.
- ее идентификация с одной из стандартных ситуаций.
- принятие решений по правилам или по аналогии с подобной стандартной ситуацией.

Справедливо следующее правило: «Знание и использование стандартных правил свидетельствует не об отсутствии творческой инициативы, а о высокой квалификации инженерного управленческого персонала, а также о высокой подготовленности специалиста»

Рис 6.1. Классификация методов принятия решений

Каждая программа по совершенствованию производства оценивается ее эффективностью. В общем случае показатель эффективности определяется одной или несколькими целевыми функциями. При этом часть целевых функций относят в ограничения задач, а одна (или несколько) из них принимается в качестве критерия эффективности программы модернизации работы предприятия. В общем случае целевая функция

$$S = S(a_1, a_2, \ldots, a_m, x_1, x_2, \ldots, x_n, v_1, v_2, \ldots, v_s) \qquad (6.1)$$

может зависеть от 3-х групп факторов:

а) $a_1, a_2 \ldots a_m$ – эти факторы определяют условия выполнения программы, которые заданы и не могут быть изменены в ходе реализации программы. Например, для конкретного АТП это место его расположения, климатические условия, финансовые ограничения и т.д.

б) $x_1, x_2 \ldots x_n$ – это управляющие факторы, которые изменяют значения целевой функции, к ним относят: уровень автоматизации АТП, квалификацию персонала, принятую технологию введения операции по обслуживанию автомобилей.

в) $v_1, v_2, \ldots, v_s$ – это случайные факторы, влияние которых на эффективность системы заранее неизвестно и может устанавливаться в ходе реализации программы. Например, миграция населения в регионе, изменения в законодательстве, появление конкурента.

При решении задач реальной модернизации производства, когда действуют все факторы необходимо выбрать такое решение, которое позволит достичь оптимального значения целевой функции. Под оптимальным значением понимается наилучшее значение целевой функции в заданном смысле. Существуют разнообразные производственные ситуации, в которых необходимо принимать решения. Две из них рассматриваются ниже.

Принятие решений в условиях определенности. В условиях определенности значение первой группы факторов определены и влияние их на целевую функцию задано. Действие 3-ей группы факторов в среднем также определено. В этом случае приходится принимать решение в соответствии со следующими ситуациями:

1. Стандартная: здесь целевая функция не строится, а решение принимается в соответствии с разработанными правилами и типовыми рекомендациями.

2. Нестандартная ситуация, когда задача принятия решения формулируется следующим образом: Определить значения $x_1, x_2, \ldots, x_n$ так, чтобы получить оптимальное значение целевой функции при заданных ограничениях $a_1, a_2, \ldots, a_m$. Например, в АТП необходимо построить цилиндрический резервуар (Рис. 6.2) с заданной емкостью V для хранения топлива с минимальным расходом листового материала.

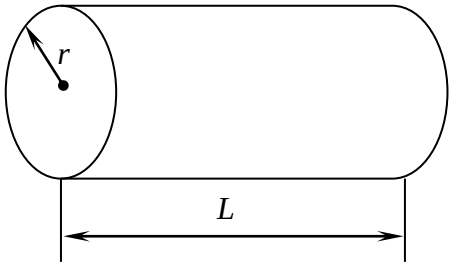

Рис.6.2. Схема резервуара для хранения топлива

Тогда имеем целевую функцию

$$S = 2\pi r^2 + 2\pi rL \to \min \qquad (6.2)$$

с ограничением

$$V = \pi r^2 L = const \qquad (6.3)$$

и управляющими факторами r и L. Эта простая задача легко решается. Дифференцируя выражение (6.2) по r ,учитывая, что $L = \frac{V}{\pi r^2}$ и приравняв результат нулю, имеем:

$$\frac{dS}{dr} = 4\pi r - \frac{2V}{r^2} = 0 \qquad (6.4)$$

Откуда получаем

$$r = \left(\frac{V}{2\pi}\right)^{1/3}; \qquad L = 2r. \qquad (6.5)$$

Методы принятия решения в условиях недостаточности информации. Как правило, при принятии технических, инженерных и управленческих решений информации о состоянии системы, ее социальных и экономических условиях является неполной. Американские специалисты в области автосервиса утверждают, что 80% решений принимают при наличии 20% информации о свойствах системы и действующих на нее факторов.

Например, принимая решение о количестве постов на станции техобслуживания можно только предполагать число потенциальных клиентов в данном регионе и их распределении по часам суток, дням недели, месяцам года. Аналогичная ситуация складывается с числом возможных заказов на ремонт конкретного вида автомобиля в течение «завтрашнего дня», выхода или невыхода на работу конкретного специалиста или рабочего. Поэтому при управлении работой предприятия автосервиса в условиях неполной информации необходимо использовать некоторые управленческие процедуры, позволяющие в определенной степени компенсировать недостаток информации. Такими процедурами можно считать:

1. Использование опыта работы аналогичных предприятий, при этом важно располагать банком решений или иметь доступ к нему. Также следует отметить, что опыт работы других предприятий нельзя использовать без корректировки на условия данного предприятия.
2. Применение специальных математических методов, основанных на теории игр, например, использование *принципа гарантированных стратегий*. В этом случае управление по модернизации системы автосервиса на предприятии вырабатывается для неблагоприятных внешних экономических условий и не всегда эффективных технологических операций. Получение решения в этих условиях позволяет предприятию не быть убыточным.
3. Использование методов имитационного моделирования, которые позволяют воспроизвести производственные ситуации, близкие к реальным и получить гарантированное решение по модернизации.
4. Использование коллективного мнения специалистов или экспертизы.

6.2. Методы экспертных решений

Методы получения экспертных оценок следует разделить на 2 группы:
1. Коллективная работа экспертных групп из числа сотрудников предприятия с целью получения решения для улучшения производственной ситуации;
2. Индивидуальная работа независимых экспертов с той же целью.

Следует заметить, что 1-я форма экспертизы имеет определенные недостатки: "лже"-патриотизм сотрудников организации и неэффективность оценки деятельности предприятия. Кроме того, имеется определенное давление авторитета руководителей при проведении экспертной оценки. К недостаткам следует отнести и отсутствие строгой процедуры учета мнений экспертов. При 2-ом подходе все этапы экспертизы более строго регламентированы и для выработки решений используется формализованные методы.

Одним из них является метод **априорного ранжирования**, который сводится к выполнению следующей процедуры:
- экспертами определяется перечень факторов, влияющих на производственную деятельность предприятия который в дальнейшем подвергается ранжированию;
- составляется анкета, в табличной форме, в которой приведены: перечень факторов, необходимые пояснения; примеры заполнения анкеты и т. д.
- экспертами производится оценка предложенных факторов, когда самому значимому фактору приписывается ранг 1, второму по значению фактору приписывается ранг 2, и т. д;
- организаторами экспертизы производится обработка экспертного опроса; на основании этой обработки разрабатываются предложения по модернизации предприятия и технологического процесса.

Рассмотрим пример априорного ранжирования для задачи определения влияния различных факторов на *коэффициент технической готовности* (часть общей проблемы улучшения технического состояния автотранспортного предприятия). Допустим, что для решения этой задачи были приглашены 8 экспертов ($m = 8$), которые выявили 4 фактора ($n = 4$), способствующих увеличению коэффициента технической готовности, а именно:
- обеспеченность производственной базой (производственные площади, специализированные цеха, автоматизированные участки и т.д.);
- мощность предприятия (характеризуется инвентарным числом автомобилей.);
- структура и разномарочность парка автомобилей;
- уровень механизации процесса технического обслуживания и ремонта.

По результатам работы экспертов заполняется Таблица 6.1, где в столбцах «эксперты» показаны поставленные ими ранги факторов a_{ik}($i = 1,...,m;\ k = 1,...,n$).

Таблица 6.1. Результаты априорного ранжирования факторов производственной базы АТП

Факторы	Номера экспертов								s_k	Δs_k	Δs_k^2	Занимаем. место	Вес фактора
	1	2	3	4	5	6	7	8					
	Ранги оценок a_{ik}												
Обеспеченность производствен. базой	2	1	2	1	1	1	2	1	11	- 9	81	1	0,4
Мощность АТП	3	4	4	2	3	2	4	4	26	6	36	3	0,2
Разномароч-ность автопарка	4	3	3	4	4	4	3	2	27	7	49	4	0,1
Уровень механизации ТО	1	2	1	3	2	3	1	3	16	-4	16	2	0,3

Затем вычисляется:

- сумма рангов в строке каждого фактора $s_k = \sum_i a_{ik}$;
- средний ранг $\bar{s} = \sum_k s_k \Big/ n$;

- отклонение значений s_k от среднего $\bar{s} = 20$, т.е. $\Delta s_k = s_k - \bar{s}$;

- сумма квадратов отклонений $\Phi = \sum_{k=1}^{n} (\Delta s_k)^2 = 182$;

- занимаемое место в соответствии со значениями s_k (чем меньше s_k, тем выше значимость фактора)
- веса факторов по формуле:

$$q_k = \frac{2 \cdot (n - k + 1)}{n(n+1)} \qquad (6.6)$$

Таким образом, по результатам данного анкетирования руководство может разработать план совершенствования производственной базы и повышения уровня механизации технического обслуживания. Кроме того, руководство должно проверить. достаточно ли согласованы мнения экспертов. Это проверяется по так называемому коэффициенту Кэндела, определяемому по формуле:

$$W = \frac{12\Phi}{m^2 \cdot (n^3 - n)} \qquad (6.7)$$

Если $W \geq 0{,}5$, то считается, что мнения экспертов согласованы, т.е. им можно верить и не надо проводить повторное исследование. В нашем примере получается:

$$W = \frac{12 \cdot 182}{64 \cdot (16-1) \cdot 4} = 0{,}57$$

что свидетельствует о надежности проведенной экспертизы.

Контрольные вопросы.

1. Какие показатели применяются для управления производственной деятельностью станций технического обслуживания?
2. Как классифицируются методы принятия решений?
3. В чем заключается процесс принятия решений?
4. Приведите примеры принятия решения в стандартной ситуации?
5. Что такое целевая функция? От каких групп факторов эта функция зависит?
6. Охарактеризуйте ситуацию принятия решения в условиях определенности?
7. Сформулируйте какую-нибудь задачу для нестандартной ситуации в условиях определенности?
8. Из квадратного листа картона со стороной *a* необходимо сделать открытую сверху коробку прямоугольной формы, вырезав по краям квадраты и загнув образовавшиеся края (Рис. 6.3). Какой должна быть высота коробки, чтобы ее объем был наибольшим?

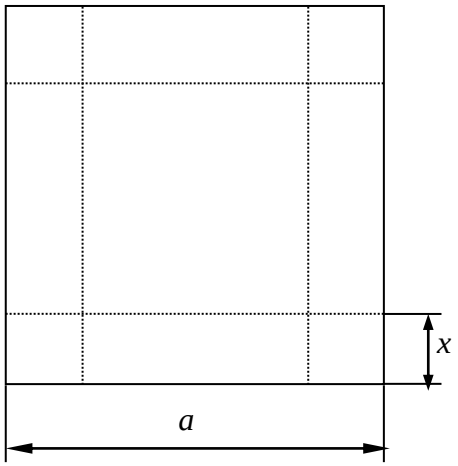

Рис. 6.3. Заготовка для коробки

9. Найти на параболе $y = x^2$ точку, ближайшую к точке $A(2; 0{,}5)$?
10. Из 3-х досок одинаковой ширины сколачивается желоб. При каком угле наклона боковых стенок к основанию площадь поперечного сечения желоба будет наибольшей?
11. Опишите какую-нибудь ситуацию для задачи принятия решения в условиях неопределенности?
12. Приведите примеры управленческих процедур, применяемых в условиях недостаточности информации.
13. Охарактеризуйте методы экспортных решений.
14. Опишите метод априорного ранжирования.
15. В чем заключаются недостатки работы экспертных групп, набранных из числа сотрудников предприятия?
16. Решить задачу априорного ранжирования факторов для увеличения коэффициентов технической готовности по результатам работы независимых экспертов (см. Таблицу 6.2)?

Таблица 6.2. Априорное ранжирование факторов производственной базы АТП по результатам работы экспертов

Факторы	Номера экспертов						
	1	2	3	4	5	6	7
	Ранги оценок a_{ik}						
Обеспеченность производствен. базой	1	2	2	1	1	2	2
Мощность АТП	2	4	3	2	2	1	4
Разномарочность автопарка	3	3	4	4	4	3	1
Уровень механизации ТО	4	1	1	3	3	4	3