

Высшее профессиональное образование

Н. Я. Яхьяев
А. В. Кораблин

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ И ДИАГНОСТИКА

Учебник



Транспорт

Н. Я. ЯХЬЯЕВ, А. В. КОРАБЛИН

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ И ДИАГНОСТИКА

УЧЕБНИК

*Допущено
Учебно-методическим объединением
по образованию в области транспортных машин
и транспортно-технологических комплексов
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство»
направления подготовки «Эксплуатация наземного транспорта
и транспортного оборудования»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2009

УДК 656(075.8)
ББК 39.1я73
Я20

Рецензенты:

декан автотранспортного факультета Владимирского государственного университета, профессор кафедры «Автомобильный транспорт»,
канд. техн. наук, доц. *Ю. В. Баженов*;
зав. отделом проблем машиноведения института физики Дагестанского
научного центра РАН, Заслуженный деятель науки Российской Федерации,
академик Академии транспорта, д-р техн. наук, проф. *М. М. Абачаров*

Яхьяев Н.Я.

Я20 Основы теории надежности и диагностика : учебник для
студ. высш. учеб. заведений / Н.Я. Яхьяев, А.В. Кораблин. —
М. : Издательский центр «Академия», 2009. — 256 с.
ISBN 978-5-7695-5734-7

Изложены основы теории надежности и диагностики применительно к наиболее емкой составляющей системы человек — автомобиль — дорога — среда. Представлены основные сведения о качестве и надежности автомобиля как технической системы. Даны основные термины и определения, приведены показатели надежности сложных и расчлененных систем и методы их расчета. Уделено внимание физическим основам надежности автомобиля, методам обработки информации о надежности и методам испытания на надежность. Показаны место и роль диагностирования в системе технического обслуживания и ремонта автомобилей в современных условиях.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 656(075.8)
ББК 39.1я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Яхьяев Н.Я., Кораблин А.В., 2009
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2009
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Основы теории надежности и диагностика» — важная составная часть учебного плана обучения студентов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» направления подготовки дипломированных специалистов «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования».

Целью преподавания дисциплины «Основы теории надежности и диагностика» является формирование у студентов системы научных знаний и профессиональных навыков по использованию основ теории надежности и диагностики применительно к решению задач технической эксплуатации автомобилей на всех этапах их жизненного цикла: проектирование, производство, контроль, хранение и эксплуатация.

Основными задачами дисциплины «Основы теории надежности и диагностика» являются:

- изучение основных определений структуры и содержания понятий надежности и диагностики;
- освоение способов сбора и обработки информации о надежности автомобилей в эксплуатации, методов оценки полученных результатов и их систематизации;
- изучение закономерностей изменения технического состояния изделий и возникновения отказов, а также факторов, влияющих на надежность и физические процессы отказов изделий;
- получение показателей надежности основных систем и узлов автомобилей в реальных условиях эксплуатации и определение оптимальных сроков службы подвижного состава;
- освоение методов диагностики и расчета диагностических параметров;
- изучение методов управления качеством продукции с использованием международных стандартов серии ИСО 9000.

ВВЕДЕНИЕ

Теория надежности и техническая диагностика — разные и в то же время тесно связанные между собой науки. *Теория надежности* не разрабатывает методы и средства поиска неисправностей в данном объекте — она располагает методами, позволяющими определять (на основе анализа статистической информации) вероятность возникновения отказов в совокупности одинаковых объектов. *Техническая диагностика* располагает методами, с помощью которых можно оценить состояние конкретного объекта. Вместе с тем многие задачи диагностики решаются на основе теории надежности.

Теория надежности — наука, изучающая закономерности отказов технических систем, основана на использовании разработок многих отраслей знаний. В структуру теории надежности входят разделы, которые могут изучаться как самостоятельные дисциплины:

- математическая теория надежности;
- физическая теория надежности (физика отказов);
- прогнозирование работоспособности;
- диагностика технического состояния;
- теория контроля показателей надежности;
- теория восстановления работоспособности.

Любые технические устройства всегда изготавливали в расчете на некоторый достаточный для практических целей период экономически эффективного использования. Однако долгое время надежность не измеряли количественно, что значительно затрудняло ее объективную оценку. Для оценки надежности использовали такие понятия, как «высокая надежность», «низкая надежность» и другие качественные определения. Установление количественных показателей надежности и способов их измерения и расчета положило начало научным методам в исследовании надежности.

Большой вклад в становление и развитие теоретических основ науки о надежности машин внесли зарубежные ученые Ф.Байхельт, П.Франкен (Германия), Р.Барлоу, Ф.Прошан (США), а также отечественные ученые В.С.Авдуевский, Б.В.Гнеденко, А.С.Проников и многие другие.

В нашей стране проблема надежности машин в концептуальном аспекте впервые была выдвинута и обсуждена на сессии Ака-

демии наук СССР в 1934 г. На первых этапах развития теории надежности основное внимание было сосредоточено на сборе и обработке статистических данных об отказах изделий. В оценке надежности преобладал характер констатации количественных характеристик потока отказов на основании статистических данных. Развитие теории надежности сопровождалось совершенствованием вероятностных методов исследования, таких как определение законов распределений наработок до отказа, разработка методов расчета и испытаний изделий с учетом случайного характера отказов и т. п.

Увеличивающаяся сложность технических устройств, возрастающая ответственность функций, выполняемых техническими системами, повышение требований к качеству изделий и условиям их работы, возросшая роль автоматизации управления техническими объектами — основные факторы, определившие главное направление в развитии науки о надежности.

Машины становятся все более сложными, состоящими из десятков тысяч элементов. Если не принимать специальные меры по обеспечению надежности, любая машина практически окажется неработоспособной.

Круг вопросов, входящих в компетенцию теории надежности, наиболее полно сформулировал академик А. И. Берг: теория надежности устанавливает закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности системы и ее элементов, рассматривает влияние внешних и внутренних воздействий на процессы в системах, создает основы расчета надежности и предсказания отказов, изыскивает способы повышения надежности при конструировании и изготовлении систем и их элементов, а также способы сохранения надежности при эксплуатации.

Первые исследования в области надежности и разработка ее концепций относятся к концу Второй мировой войны. Поводом для организации работ в этой области в США послужил тот факт, что созданная в годы войны техника не обеспечивала ожидаемую эффективность ее использования из-за многочисленных отказов. Так, например, до 60 % самолетов, предназначенных для Дальнего Востока, оказались неработоспособными; 50 % электронной аппаратуры выходило из строя во время хранения до использования по назначению.

Нарботка до отказа электронных устройств в самолетах-бомбардировщиках составляла всего 20 ч; 70 % электронных устройств, используемых в Военно-морском флоте, выходили из строя в начальный период эксплуатации. Тот факт, что наиболее низкой надежностью обладала электронная аппаратура, послужил стимулом для первоочередного развертывания работ по надежности применительно к этому виду техники. Первыми организациями, развернувшими исследования в области надежности военного сна-

ряжения, были специально созданные Комитет развития электронных ламп (1943), Управление по электронным лампам (1946), Управление по аэронавигационной радиоаппаратуре (1946), Управление по авиационным материалам (1947), Управление по исследованиям и развитию в области авиации (1950). В этот период к работам в области надежности подключились и другие научно-исследовательские организации США.

В августе 1952 г. была организована консультативная группа по надежности в области электронной аппаратуры, которая разработала первые стандарты по надежности (MIL — Reliability).

Первый национальный симпозиум по надежности состоялся в Нью-Йорке в 1954 г. С тех пор симпозиум проводится ежегодно.

Все последующие этапы развития работ в области надежности некоторые зарубежные специалисты подразделяют на три этапа.

Первый этап (1943—1958) — «карандашно-бумажный». В этот период выполняли статистико-вероятностные описания наработок до отказа, основанные на экспоненциальном законе их распределения. Моменты наступления отказа и их причины рассматривали как случайные события, обладающие фатальной неизбежностью, в отрыве от причин, вызывающих появление отказов.

Второй этап (1958—1968) характеризовался широким развитием работ по экспериментальной оценке фактической надежности, сбору и обработке эксплуатационной информации о надежности. В результате осуществленных на этом этапе работ была пересмотрена концепция случайности причин отказов и их неизбежности, были объяснены многие случайные отказы и установлена взаимосвязь между конструкцией изделия, технологией изготовления и причинами отказов. Информация о надежности изделий стала более полной, что позволило внести значительную ясность в сущность отказов.

Третий этап (с 1968 г.) характеризуется как дальнейшим развитием математической теории надежности, так и сближением этой науки с техническими дисциплинами, приданием надежности инженерной направленности. Несмотря на то, что в настоящее время еще продолжается публикация отдельных работ, основанных на концепции случайности причин отказов и их неизбежности, большинству работ на этом этапе присущи следующие принципы:

- отказ от концепции случайности причин отказов и их неизбежности и связь отказов с конструктивно-технологическими факторами;
- необходимость установления причин отказов, а не только констатация их случаев и числа;
- отсутствие направленности методов промышленного контроля, действующих на предприятиях, на выявление дефектов, приводящих к отказам;

- необходимость повсеместного перехода на контроль надежности в условиях изготовления.

Развитие вопросов надежности в нашей стране может быть также подразделено на три рассмотренных этапа.

Современным концепциям организации работ в области надежности в большинстве стран придается конкретная практическая направленность. Так, в Японии издано специальное руководство для директоров фирм, в котором определен состав конкретных мероприятий при проведении работ в области надежности:

- анализ причин отказов изделий-аналогов;
- использование стандартизованных элементов;
- упрощение конструкции системы (изделия);
- устранение ошибок при конструировании и изготовлении;
- постоянное изучение достигнутого уровня надежности;
- обеспечение требуемого уровня надежности комплектующих элементов;
- использование резервирования;
- обеспечение легкости осмотра и технического обслуживания;
- четкая регламентация в технических условиях режимов эксплуатации и функциональных ограничений;
- установление условий хранения и максимально допустимой длительности хранения;
- выбор необходимой упаковки, учитывающей удары и вибрации при транспортировании;
- выбор субподрядчиков, поставляющих продукцию гарантированного качества, и контроль за их деятельностью;
- учет времени выполнения изделием своих функций и регламентация допускаемого срока использования изделия;
- точное соблюдение регламента технических обслуживаний.

Отработка на надежность серийно изготавливаемых изделий должна включать в себя:

- организацию сбора и обработки информации о надежности изделий в процессе эксплуатации;
- организацию анализа рекламаций, претензий потребителей и данных служб гарантийного ремонта;
- выявление составных частей, лимитирующих надежность изделий (слабых элементов);
- установление причин отказов и повторяемости каждого из них;
- выявление технологических параметров, оказывающих решающее влияние на надежность изделий и их комплектующих;
- разработку и реализацию мероприятий по устранению причин наиболее часто повторяющихся отказов.

Методы промышленного контроля качества изготовления должны строиться таким образом, чтобы они обеспечивали выпуск

каждого изделия с требуемым уровнем безотказности и долговечности. Все параметры технологического процесса, оказывающие решающее влияние на безотказность и долговечность, должны находиться под непрерывным контролем.

Система технического обслуживания должна быть разработана и организована до начала серийного изготовления.

Для организации обратной связи между стадиями эксплуатации и ремонта должна быть организована работа по сбору и обработке информации о надежности изделий. Организацию и координацию работ по отработке на надежность вновь проектируемых изделий и повышению надежности серийно изготавливаемых изделий должна осуществлять служба надежности, создаваемая на промышленных предприятиях (объединениях), а также в конструкторско-технологических и отраслевых научно-исследовательских институтах.

Следует отметить, что теоретические и практические исследования в области надежности развивались по двум основным направлениям.

Первое направление связано с развитием математических методов оценки надежности, особенно применительно к сложным системам. В этом случае на основе статистической обработки результатов наблюдений за отказами разрабатывают методы, обеспечивающие высокий уровень надежности путем оптимизации структуры сложной системы. Это направление возникло в радиоэлектронике.

Второе направление связано с изучением физических процессов старения (изнашивания, усталостного разрушения, коррозии, кавитации и др.). В этом случае разрабатывают соответствующие методы расчета на долговечность и применяют технологические способы, обеспечивающие необходимую надежность конструктивных элементов. Это направление возникло в машиностроении.

Современное состояние теории надежности отражает процесс взаимного слияния этих двух направлений, перенесение рациональных идей из одной области в другую и формирование на этой основе единой науки о надежности изделий.

Термин «диагностика» происходит от греческого слова *diagnos-ticos* — способный распознавать.

До недавнего времени одни исследователи отождествляли диагностику с контролем при техническом обслуживании автомобиля и на основании этой предпосылки считали, что диагностика должна быть полностью совмещена с техническим обслуживанием и ремонтом; другие же, наоборот, — что диагностика качественно отлична от контроля и должна существовать только отдельно от технического обслуживания и текущего ремонта. Сообразно этим взглядам формировались различные требования к методам и средствам диагностики.

В настоящее время большинство исследователей определяют диагностику как науку о формах проявления отказов, методах и средствах определения технического состояния и прогнозирования ресурса работы технических устройств без их разборки.

Диагностика включает в себя контроль технического состояния автомобиля, прогноз ресурса его безотказной работы и заключение о необходимых технических воздействиях на механизм.

Контроль состоит в сравнении показателей технического состояния механизма, выраженных диагностическими сигналами, с нормативами. На основании этого выявляют неисправности механизмов.

Прогноз ресурса — это определение возможности пробега автомобиля до очередной диагностики. Задача прогноза ресурса сводится к экстраполяции закономерности изменения работоспособности объекта до достижения им предельного состояния, обусловленного технико-экономической целесообразностью дальнейшего использования.

Заключение включает в себя перечень необходимых воздействий на механизм как ремонтного (по результатам контроля), так и профилактического (по результатам прогноза) характера.

В перспективе, по мере развития методов и средств диагностики, когда производительность процессов выявления неисправностей и достоверность прогноза позволят существенно сузить объем профилактических работ, диагностика займет в технологическом процессе технического обслуживания не сопутствующее, а ведущее место. Это должно привести к снижению объема обязательных работ по техническому обслуживанию.

Развитие диагностики будет способствовать совершенствованию всей системы технического обслуживания и ремонта автомобилей.

Надежность — важнейшее свойство качества продукции

1.1. Качество продукции и услуг — важнейший показатель успешной деятельности предприятий транспортно-дорожного комплекса

В настоящее время, когда Россия стремится глубже интегрироваться с мировым сообществом, все актуальнее становится решение проблем обеспечения качества продукции, выпускаемой отечественной промышленностью. Продвижение российской продукции на западный рынок неизбежно столкнется с жесткой конкуренцией аналогичной продукции других развитых стран мира. В условиях конкуренции отечественные предприятия смогут выжить только в том случае, если качеству выпускаемой ими продукции и услуг будет придаваться первоочередное значение и оно будет рассматриваться как инструмент обеспечения устойчивости экономики.

В высокоразвитых странах мира стратегическое значение качества продукции уже давно оценили не только руководители фирм и предприниматели, но и политики от экономики. Бурный прогресс в области микроэлектроники и вычислительной техники способствует практической реализации на промышленных предприятиях новых, эффективных методов и средств обеспечения качества. Не обладая достаточно высоким уровнем качества, отечественная продукция (в первую очередь машины, приборы и т. п.) не сможет утвердиться со средними и высокими ценами на мировом рынке. Например, основой успеха японской промышленной продукции на европейских рынках было сочетание новейшей технологии (технических инноваций) с высоким качеством изделий их предприятий при сравнительно низких ценах. Таким образом, обеспечение качества продукции на всех этапах ее жизненного цикла — важнейший инструмент в поддержании и укреплении конкурентоспособности. Решение этой важной задачи невозможно без выработки общих принципов, общих и специальных методов изучения механизмов и процессов изменения параметров изделий или их частей. Сюда же следует отнести и проблемы управления качеством продукции и услуг. Этот комплекс составляет

ядро теории надежности, интегрированной в общую проблему качества.

Актуальность проблемы повышения надежности различных машин с течением времени не только не снижается, а наоборот, — возрастает. На работы по восстановлению изношенных деталей, обеспечивающих работоспособность машин, в технически развитых странах расходуется до 5 % национального дохода.

Одной из важнейших и крупнейших отраслей общественного производства является транспорт (от лат. *transporto* — переносу, перемещаю, перевожу). Это огромная сфера приложения человеческого труда и потребления материальных ресурсов, гигантская динамическая система. Широчайший спектр влияния транспорта на все сферы человеческой деятельности и развитие общества в целом предъявляет многоплановые требования к надежности функционирования дорожного движения, являющегося сложной динамической системой взаимодействия транспортных и пешеходных потоков, совокупностью четырех ее составляющих: человек — автомобиль — дорога — среда (Ч—А—Д—С).

Сложность управления такой системой заключается в необходимости обеспечения надежности функционирования каждого отдельного элемента, входящего в эту систему. В противном случае возникающая диспропорция нарушает эффективную работу всей системы.

Увеличение интенсивности, изменение структуры и скоростных режимов транспортных потоков предъявляют все более жесткие требования к конструктивной и эксплуатационной безопасности автомобилей, надежности технических средств управления и организации дорожного движения. Резко возрастает цена ошибки не только в конструкции машин и механизмов, но также специалистов по эксплуатации наземного транспорта и транспортного оборудования.

Учитывая важность, объемность и многоплановость комплексного решения проблемы совершенствования надежности системы Ч—А—Д—С, в настоящей книге рассматривается лишь одна, но наиболее емкая ее составляющая — надежность автомобиля и его конструктивных элементов.

Совершенствование конструктивной и эксплуатационной надежности автомобильного транспорта, а также устройств и оборудования по техническому регулированию движения является основой для улучшения качества и безопасности дорожного движения.

Качество, в частности автомобильного транспорта, оценивается с помощью различных показателей: назначения, надежности, технологичности, унификации и др.

Надежность является одним из основных свойств и во многом определяет качество изделий.

Основы научного подхода к исследованию надежности и пути ее повышения для различных объектов изучает теория надежности.

Для обеспечения надежного функционирования транспортно-дорожного комплекса необходимо постоянно совершенствовать конструкцию и технологию производства машин и механизмов, разрабатывать и внедрять мероприятия по поддержанию работоспособности машин в эксплуатации.

Решать эти задачи призваны инженерные кадры, знакомые с теорией надежности машин и их диагностикой, и способные применять свои знания на практике.

1.2. Понятия «качество» и «надежность» машин

Жизнь современного общества немыслима без использования самых разнообразных по конструкции и назначению машин, которые преобразуют энергию, материалы, информацию, изменяют жизнь людей и окружающую среду.

Несмотря на огромное разнообразие всех машин, в процессе их развития применяют единые критерии для оценки степени их совершенства.

В условиях рыночных отношений создание большинства новых машин требует соблюдения важнейшего условия конкурентоспособности, а именно придания им новых функций и высоких технико-экономических показателей их использования.

Для эффективного использования машин необходимо, чтобы они обладали высокими показателями качества и надежности.

Международный стандарт ИСО 8402—86 (ISO — International Organization Standardization) дает следующее определение: «*Качество* — это совокупность свойств и характеристик продукции или услуги, которые придают им способность удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности».

Под качеством следует понимать совокупность эксплуатационных свойств, определяющих степень пригодности, например, автомобиля в целом и его конструктивных элементов к выполнению заданных функций.

При решении различных задач, связанных с оценкой надежности машины, необходимо, в первую очередь, установить *выходные параметры*, которые являются основной характеристикой объекта. Изменение этих параметров в процессе эксплуатации влияет на состояние объекта.

Для этого необходим анализ функций, выполняемых машиной, и тех требований, которые к ней предъявляются. Каждая

машина служит для достижения определенных целей, которые зависят от ее назначения.

Для численной оценки технического уровня машины применяют набор выходных параметров.

Выходные параметры машины — это числовые показатели ее технических характеристик, которые определяют состояние машины и ее возможности по выполнению заданных функций.

Приведем пример выбора и анализа выходных параметров автомобиля.

На рис. 1.1 приведена схема установления перечня выходных параметров автомобиля, при помощи которых можно оценить его работоспособность и уровень качества.

Основным источником для получения выходных параметров являются характеристики движения автомобиля при различных режимах его работы и условиях эксплуатации (например, плавность хода, курсовая устойчивость, максимальная скорость, время разгона и т.д.).

Каждое эксплуатационное свойство автомобиля характеризуется одним или несколькими показателями, которые могут принимать различные количественные значения. Например, свойство динамичности автомобиля характеризуется максимальной скоростью и временем разгона автомобиля до 100 км/ч (у ВАЗ-2110 «Лада» эти показатели составляют, соответственно, 175 км/ч и 12,2 с), свойство экономичности характеризуется расходом топлива на 100 км пробега (у ВАЗ-2110 «Лада» эти показатели составляют 7 л при скорости 90 км/ч) и т.д. Есть также свойства автомобиля, которые в процессе эксплуатации не изменяются, например грузоподъемность, пассажироместимость, габаритные размеры и др.

Однако показатели большинства свойств, определяющих качество автомобиля в процессе эксплуатации, изменяются (динамичность, экономичность, мощность двигателя и пр.). Интенсивность изменения этих свойств можно в процессе эксплуатации уменьшить, т.е. управлять ими при условии знания закономерностей их изменения.

Анализ изменения свойств автомобиля и его конструктивных элементов (КЭ) сопряжен с необходимостью проведения полномасштабных исследований процессов физического старения деталей и узлов.

Поскольку использование большинства машин осуществляется в течение определенного, как правило, длительного периода времени, то под влиянием различных факторов происходит изменение свойств, которые определяют его качество.

Исследование надежности нацелено на определение закономерностей изменения показателей качества изделий, с течением времени, и на разработку методов, обеспечивающих необходи-

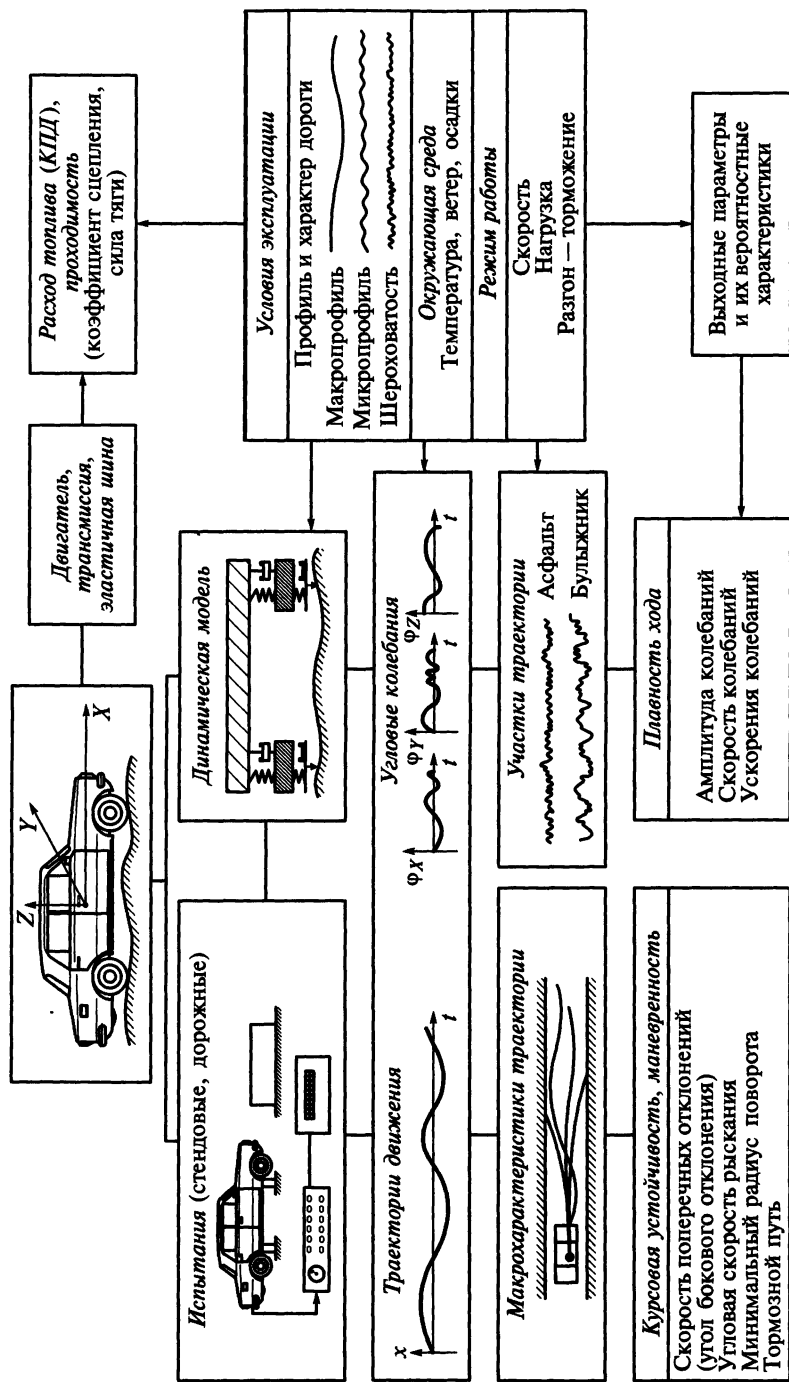


Рис. 1.1. Выходные параметры автомобиля:

x — отклонение от траектории движения; ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z — угловые перемещения относительно осей координат, ...; t — время, с

мую продолжительность работы технических устройств с наименьшими затратами времени и средств.

Надежностью называют свойство машины сохранять свои показатели качества в определенных пределах в течение всего периода ее использования.

Нельзя создать идеальную, абсолютно надежную машину, которая неизменно находилась бы в том же состоянии, что и новая. Ее показатели постепенно изменяются. Изменение показателей качества машины во времени может быть абсолютным и относительным.

Абсолютное изменение качества связано с различными процессами, действующими на машину, изменяющими свойства или состояние материалов, из которых она выполнена. В связи с этим изменяются эксплуатационные показатели и происходит физическое старение машины.

Относительное изменение качества машины связано с появлением новых машин с более совершенными характеристиками. Поэтому показатели данной машины становятся более низкими по сравнению со средним уровнем, хотя их абсолютные значения могут и не измениться. Этот процесс снижения показателей машин, относительно требований сегодняшнего дня, называют *моральным старением*.

Наука о надежности изучает изменение показателей качества машины под влиянием тех причин, которые приводят к абсолютным изменениям свойств изделий. Относительное изменение качества здесь не затрагивается.

Надежность машины закладывается и поддерживается на протяжении ее жизненного цикла, начиная с этапа проектирования, в процессе изготовления и эксплуатации.

При проектировании машины устанавливают и обосновывают необходимые требования к надежности, что обеспечивают за счет оптимизации конструкции и применяемых материалов. При этом учитывают технологичность конструкции, разрабатывают методы защиты машины от различных вредных воздействий в эксплуатации, рассматривают возможности автоматического восстановления утраченной работоспособности, оценивают приспособленность машины к проведению ремонтов и технического обслуживания.

При изготовлении (производстве) машины обеспечивают и контролируют ее надежность, так как она зависит от технологического процесса изготовления деталей, методов контроля выпускаемой продукции, испытания, доводки и других показателей.

При эксплуатации машины реализуется ее надежность, которая зависит от методов и условий эксплуатации машины, принятой системы ее ремонта, методов технического обслуживания, применяемых режимов работы и других эксплуатационных факторов.

Уровень надежности машины должен быть таким, чтобы при ее использовании в любых оговоренных техническими условиями (ТУ) ситуациях не возникали ее отказы. Кроме того, во многих случаях желательно, чтобы машина имела запас надежности для повышения сопротивляемости экстремальным воздействиям, когда машина попадает в условия, не предусмотренные ТУ.

Уровень надежности машины можно оценить некоторым коэффициентом K (запас надежности), который характеризует поведение машины в нормальных условиях эксплуатации (предусмотренных ТУ) в сравнении с ее поведением в экстремальных ситуациях.

При $K < 1$ не обеспечивается необходимая надежность машины и имеется вероятность возникновения отказов, особенно при напряженных режимах работы машины и интенсивном воздействии окружающей среды. При $K = 1$ машина удовлетворяет всем требованиям надежности, а при $K > 1$ имеется запас надежности для возможности сохранять работоспособность и функционировать при экстремальных ситуациях.

Кроме того, запас надежности необходим для обеспечения работоспособности машины при ее износе. Износ приводит к постепенному ухудшению технических характеристик машины. Поэтому, чем выше запас надежности, тем дольше при прочих равных условиях машина будет находиться в работоспособном состоянии.

Недостаточный уровень надежности машины (как новой, так и изношенной) может привести к различным последствиям при нарушении ее работоспособности, основными из которых являются:

- прекращение функционирования изделия в результате поломки, деформации, заклинивания механизмов, возникновения катастрофических процессов (разрушения конструкции, пожара и др.);
- снижение эффективности работы изделия, когда оно способно функционировать, но с меньшими скоростями, КПД, производительностью, мощностью, точностью и другими техническими характеристиками, которые были достигнуты для новой неизношенной машины.

Надежность машины характеризуется изменением во времени тех ее «выходных» параметров, которые определяют качество машины и должны находиться в установленных пределах.

Поэтому оценка надежности машины, анализ причин и последствий изменения ее технических характеристик в процессе длительной эксплуатации являются основой всей проблемы надежности.

1.3. Надежность и общечеловеческие проблемы

Проблема надежности непосредственно связана с нашей жизнью и участвует в решении многих важных проблем общества.

Создавая новые машины, человек стремится не только к их совершенству, но и к тому, чтобы в течение всего периода «жизни» каждой машины использовались возможности, заложенные в ее конструкцию. В связи с этим обеспечение высокого уровня надежности машин и различных изделий становится одной из коренных проблем техники.

Ненадежные машины являются причинами аварий и катастроф, в которых гибнут люди и наносится материальный урон. Даже при обычных отклонениях от нормальной работы машин возникают серьезные проблемы для общества.

Рассмотрим кратко некоторые проблемы общества, связанные с надежностью машин.

Надежность и затраты на восстановление работоспособности машинного парка [21]. Огромные средства затрачиваются в мире для того, чтобы машинный парк находился в работоспособном состоянии. Создание ремонтных предприятий и заводов по изготовлению запасных частей, применение служб по ремонту и техническому обслуживанию машин — все это является следствием того, что машины теряют свою работоспособность из-за процессов изнашивания, коррозии, усталостного разрушения и других процессов, приводящих к «старению» машины.

По разным источникам на ремонт и техническое обслуживание машин за все время их эксплуатации затрачивается в 5—10 раз больше средств, чем на изготовление новых.

В индустриально развитых странах приблизительно 4,5 % валового национального дохода тратится на трение, износ и коррозию подвижных соединений технических изделий. Это приводит к огромным потерям сырьевых материалов и энергии во всем мире.

Особенно велики потери от недостаточной надежности уникальных дорогостоящих машин. При выходе их из строя по непредвиденным обстоятельствам велика опасность трагических последствий для людей и окружающей среды (например, оборудование атомных электростанций, химических предприятий, пассажирских самолетов, космических аппаратов и т. п.).

Поэтому все большее внимание во всем мире уделяется вопросам совершенствования эксплуатации и ремонта промышленных изделий.

Во многих случаях целесообразно увеличивать затраты на повышение надежности вновь создаваемой машины, чтобы существенно сократить затраты на ее ремонт и техническое обслуживание в процессе эксплуатации.

Надежность деталей и механизмов в последние десятилетия не может угнаться за ростом сложности систем.

Одним из основных путей разрешения противоречия «сложная система — надежность» является введение в систему избыточности.

Именно избыточности обязаны своим существованием чрезвычайно сложные и, тем не менее, высоко надежные устройства. Примером тому могут служить живые организмы. Человеческое существо, в целом, также является «защищенной» восстанавливаемой системой. Существование этой системы обусловлено не столько относительно высокой надежностью его «элементов», сколько большей «избыточностью».

Примеров повышения надежности за счет резервирования можно привести много: применение дублирующих элементов на транспорте и при построении энергосистем, увеличение числа двигателей на самолетах, запасное колесо автомобиля, запасной парашют у парашютиста.

Резервирование остается самым оперативным и действенным средством обеспечения требуемой надежности систем. Это в первую очередь касается многих отраслей техники и в том числе автомобильной промышленности.

Несмотря на большие затраты, повышение надежности за счет резервирования является неременным средством, с помощью которого обеспечивается безопасность летательных аппаратов, эффективность работ различных систем массового обслуживания и наземных систем транспорта.

Обобщение существующих методов определения оптимальной долговечности машин показало, что подавляющее большинство отечественных и зарубежных авторов под оптимальной долговечностью машины по износу понимают такой срок ее службы, при котором затраты на ее использование (затраты на приобретение и капитальный ремонт, а также эксплуатационные расходы) за весь период эксплуатации, отнесенные на единицу произведенной продукции (работы), будут минимальными. Иными словами, в качестве критерия оптимальности здесь принимается достижение минимальной себестоимости продукции (работы), произведенной с помощью данной машины за весь ее амортизационный срок службы.

Наибольшее распространение получила методика определения оптимального срока службы машин по материальному износу.

На рис. 1.2 представлен характер изменения себестоимости единицы продукции (работы) машины по отдельным статьям и группам статей, ее составляющих, в зависимости от изменения амортизационного срока службы.

Удельные амортизационные отчисления на реновацию (восстановление), как известно, с увеличением срока службы машины уменьшаются по гиперболическому закону (кривая 3).

Оптимальный срок службы машин по материальному износу имеет и самостоятельное значение, так как позволяет найти наилучшее соотношение между затратами на изготовление и эксплуатацию машины.

Надежность и эффективность труда. Последствия недостаточной надежности машины связаны не только с необходимостью восстановления ее работоспособности или замены новой, но и с тем, что в этот период машина не выполняет своих функций. В результате нарушается ритм производства, возможна остановка связанных с данной машиной других механизмов и машин. Все это может привести к снижению качества выпускаемой продукции и эффективности труда на производственном предприятии. Это особенно проявляется в работе автоматизированных систем, когда в единый комплекс связаны машины и агрегаты различного назначения, но выполняющие общую задачу.

Следовательно, эффективность работы таких систем непосредственно связана с проблемой надежности машин.

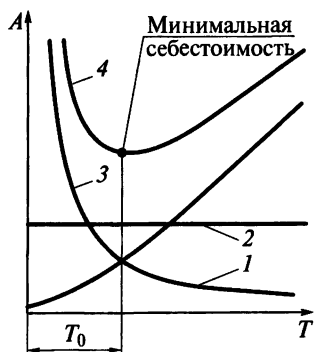
Надежность и безопасность. Недостаточный уровень надежности изделий приводит к большим экономическим потерям.

Низкий уровень надежности изделий может привести к таким последствиям, которые нельзя оценить никакими экономическими показателями. Это гибель людей в результате катастроф, отказов техники в ответственные моменты, необратимых разрушений окружающей среды.

Например, авария на Чернобыльской атомной электростанции привела к таким трагическим последствиям, влияние которых на общество ощущалось на протяжении десятилетий. К сожалению, в мире постоянно происходят многочисленные аварии и катастрофы. Статистический анализ свидетельствует, что ежегодно в мире в автомобильных авариях погибают в среднем около 500 тыс. чел. Основной причиной автомобильных аварий является недостаточная надежность функционирования системы Ч—А—Д—С.

Рис. 1.2. Изменение себестоимости единицы продукции A в зависимости от срока службы машины T :

1 — удельные эксплуатационные расходы, возрастающие с увеличением срока службы машины; 2 — удельные эксплуатационные расходы, не изменяющиеся с увеличением срока службы машины; 3 — удельные амортизационные отчисления на восстановление; 4 — себестоимость единицы продукции по сумме всех затрат; T_0 — время достижения минимальной себестоимости единицы продукции



Надежность автомобиля и его систем является одним из основных факторов в проблеме безопасности дорожного движения.

Надежность и экология. Нарушение работоспособности и выход из строя машин и технических устройств приводит не только к ухудшению безопасности жизнедеятельности человека и увеличению экономических затрат, но и оказывают непосредственное влияние на окружающую среду и экологическую обстановку на нашей планете.

Работа машин, когда их характеристики, такие как состав отработавших газов, динамические нагрузки, температура и другие, выходят за допустимые пределы, приводят к вредным, часто разрушительным воздействиям на биосферу, на неживую природу, на атмосферу, на весь механизм взаимодействия в окружающем нас мире. Это особенно проявляется при непредвиденных обстоятельствах или при ликвидации последствий аварии.

От уровня надежности различных по своему назначению машин и технических устройств непосредственно зависят выбросы в атмосферу вредных веществ (автотранспорт, авиация, металлургия), тепловые воздействия на окружающую среду, последствия аварий, особенно если это связано с радиоактивным заражением (аварии на АЭС, на атомных подводных лодках), пожары, вызванные, например, падением самолета, загрязнение океана нефтью при аварии танкера и другие аналогичные события.

Учитывая огромный машинный парк планеты, даже незначительные воздействия на окружающую среду суммируются и порождают серьезные проблемы, заставляют ужесточать требования к выходным параметрам машин, не допускать нарушения установленных требований при их эксплуатации, т.е. повышать надежность машин.

Надежность и маркетинг. В проблеме создания конкурентоспособной продукции и отыскания наиболее эффективных путей ее сбыта существенную роль играет уровень надежности поставляемой потребителю продукции.

Отказ машины (например, автомобиля) в процессе использования, если даже это не приводит к тяжелым последствиям, наносит серьезный моральный ущерб фирме-изготовителю и подрывает доверие к ней.

Чем выше гарантированный изготовителем уровень надежности машины, тем, при прочих равных условиях, большей конкурентоспособностью она будет обладать.

Таким образом, проблема надежности активно внедряется во все сферы человеческой деятельности, устанавливает свои требования и ограничения к уровню надежности создаваемых машин.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение качества в соответствии с ИСО 8402 — 86.
2. Что следует понимать под качеством автомобиля?
3. Дайте определение надежности.
4. Как следует понимать абсолютное изменение качества?
5. Что следует понимать под моральным износом машины?
6. Что изучает наука о надежности?
7. Какова роль надежности машин в решении общечеловеческих проблем?
8. Как связана проблема надежности с затратами на восстановление работоспособности машинного парка?
9. Приведите пример, показывающий связь надежности с эффективностью труда.
10. Какова связь надежности с безопасностью человеческого общества?
11. Каково влияние надежности машин на экологию?
12. Как проблема создания конкурентоспособной продукции связана с надежностью машин?
13. Что является основой всей проблемы надежности?

Основные понятия, термины и определения, принятые в области надежности

2.1. Объекты, рассматриваемые в области надежности

2.1.1. Общие понятия

В теории надежности используют понятия «объект», «элемент», «система», а также другие обобщающие многочисленные понятия, встречающиеся в технике, например «автомобиль», «машина», «агрегат», «узел», «деталь», «изделие» и др.

Основной задачей теории надежности является изучение закономерностей возникновения отказов и неисправностей объекта и на базе результатов исследований — разработка мероприятий, направленных на обеспечение выполнения объектом заданных функций с наименьшими затратами.

Используемый в тексте термин «*объект*» является наиболее общим наименованием изделия, например автомобиля, оборудования или отдельной сборочной единицы. Объект, предназначенный для самостоятельного выполнения заданных функций, будем называть *системой*.

Практически любой объект с определенной точки зрения может рассматриваться как система. Например, кривошипно-шатунный механизм двигателя внутреннего сгорания, подшипник качения или какой-либо другой узел, объединяющий несколько деталей по их общему функциональному назначению в машине.

Любая система состоит из *элементов*. Например, автомобиль (рис. 2.1) как техническая система включает в себя следующие элементы: двигатель, трансмиссию, ходовую часть, электрооборудование, системы управления и др.

Такое понимание технической системы перекликается с ее описанием, которое приводит Н. Н. Матвиенко [16]: «Всякая техническая система есть совокупность вещественных, энергетических и информационных элементов (иначе говоря — вещественных частей и деталей, энергетических ресурсов их функционирования и набора предписаний, инструкций, команд, сигналов, определяющих последовательность и вид взаимодействий вещественных элементов с окружающими системами и между собой)».

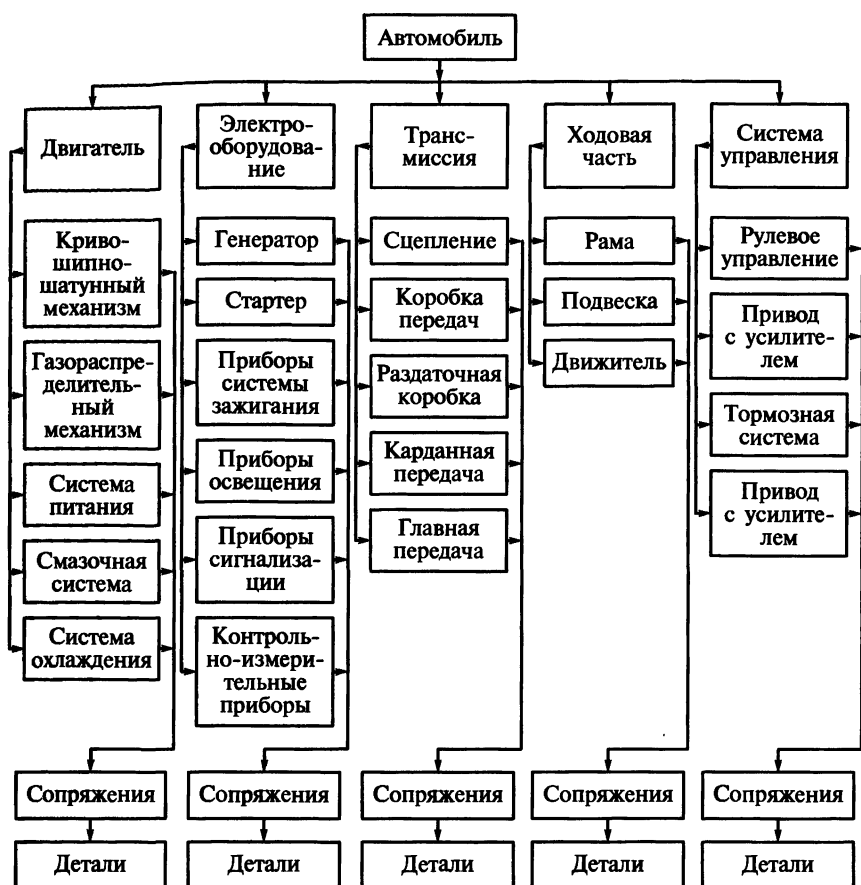


Рис. 2.1. Структурная схема автомобиля

Система представляет собой целесообразно взаимосвязанную совокупность элементов. Например, если автомобиль рассматривается в качестве системы, то его отдельные детали и сборочные единицы являются элементами.

2.1.2. Классификация технических систем

Технические системы могут быть невозстанавливаемыми и восстанавливаемыми, длительного и короткого времени работы, резервированными и нерезервированными.

Техническую систему называют *невозстанавливаемой* (неремонтируемой), если ее отказ приводит к неустраняемым последствиям и систему нельзя использовать по своему назначению. Работа пос-

ле отказа невосстанавливаемой системы считается невозможной или нецелесообразной. Типичными примерами невосстанавливаемых систем являются полупроводниковые приборы и электронные платы в системах управления современного автомобиля, подшипники качения, тормозные колодки и т.п.

Под *восстанавливаемой* (ремонтируемой) понимают систему, которая может продолжать выполнение своих функций после устранения отказа, вызвавшего прекращение ее функционирования. Работа восстанавливаемой системы после отказа может быть возобновлена в результате проведения необходимых восстановительных работ. Типичными примерами восстанавливаемых систем являются двигатели внутреннего сгорания, коробки передач и т.п. При этом под восстановлением системы понимают не только ремонт тех или иных элементов системы, а также полную замену отказавших элементов на новые.

Существуют системы смешанного типа, у которых часть элементов может восстанавливаться, а другая — нет.

В зависимости от выполняемых функций различают системы длительного и системы короткого времени работы.

Резервированием (redundancy) называют способ повышения надежности путем включения резервных единиц, способных в случае отказа основного устройства выполнять его функции. Этот метод обладает большими возможностями получения заданных уровней надежности и имеет широкое практическое применение.

2.2. Основные состояния объекта (технической системы)

В процессе эксплуатации объект может находиться в одном из следующих состояний: исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном и предельном.

Исправное состояние (исправность, good state) — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и(или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние (неисправность, faulty state) — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Различают неисправности, не приводящие к отказам (нарушение лакокрасочного покрытия, износ протектора колеса), и неисправности, ведущие к возникновению отказа (трещина металлоконструкции рамы, изгиб лопасти вентилятора системы охлаждения двигателя).

Работоспособное состояние (работоспособность, up state) — состояние объекта, при котором значения всех параметров, ха-

рактизирующих способность выполнять заданные функции, соответствующим требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Параметры, характеризующие выполнение функций, обуславливают эксплуатационные показатели изделия: производительность, мощность, тягово-скоростные характеристики, параметры рабочего процесса и пр.

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

Работоспособность и неработоспособность в общем случае могут быть *полными* или *частичными*. Полностью работоспособный объект обеспечивает в определенных условиях максимальную эффективность его применения. Эффективность применения частично работоспособного объекта меньше максимально возможной, но значения ее показателей при этом еще находятся в пределах, установленных для такого функционирования, которое считается нормальным. Частично неработоспособный объект может функционировать, но уровень эффективности при этом ниже допустимого. Полностью неработоспособный объект применять по назначению невозможно.

Понятия частичной работоспособности и частичной неработоспособности применяют главным образом к сложным системам, для которых характерна возможность нахождения в нескольких состояниях. Эти состояния различаются уровнями эффективности функционирования системы.

Предельное состояние объекта (limiting state) — состояние, при котором дальнейшая его эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. В этом случае эксплуатацию прекращают из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого ухода заданных параметров за установленные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой. Автомобиль, достигший своего предельного состояния, направляют в капитальный ремонт или списывают.

Признаки (критерии) предельного состояния устанавливают нормативно-технической документацией на данный объект.

Для восстанавливаемых объектов (автомобилей) переход в предельное состояние определяется наступлением момента, когда дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна вследствие следующих причин:

- становится невозможным поддержание его безопасности, безотказности или эффективности на минимально допустимом уровне;

• в результате изнашивания и (или) старения объект пришел в такое состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает необходимой степени восстановления исправности или ресурса.

Для некоторых восстанавливаемых объектов предельным состоянием считается такое, когда необходимое восстановление исправности может быть осуществлено только с помощью капитального ремонта.

2.3. Переход объекта в различные состояния. Виды и характеристики отказов технических систем

Переход изделия из работоспособного состояния в неработоспособное осуществляется при наступлении такого события, как отказ. Классификация отказов приведена в табл. 2.1.

Повреждение (damage) — событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении его работоспособности.

Отказ (failure) — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Критерий отказа (failure criterion) — признак или нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и(или) конструкторской документации.

Таблица 2.1

Классификация отказов

Признак	Вид отказа
Значимость	Критический Существенный Несущественный
Зависимость	Зависимый Независимый
Характер возникновения	Внезапный Постепенный
Характер обнаружения	Явный Скрытый
Причина возникновения	Конструктивный Производственный Эксплуатационный Деградационный

Восстановление (restoration, recovery) — это процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния.

Авария — событие, заключающееся в переходе объекта с одного уровня работоспособности или относительного уровня функционирования на другой, существенно более низкий, с крупным нарушением режима работы объекта. Авария может привести к частичному или полному разрушению объекта, созданию опасных условий для человека и окружающей среды.

Отказ — фундаментальное понятие теории надежности. Для каждого объекта признаки (критерии) отказов установлены нормативно-технической документацией.

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

Скрытый отказ (latent failure) — отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

Сбой (Interruption) — самоустраниющийся отказ или однократный отказ, устранимый незначительным вмешательством оператора.

Ресурсный отказ (marginal failure) — отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

Независимый отказ (primary failure) — отказ, не обусловленный другими отказами.

Зависимый отказ (secondary failure) — отказ, обусловленный другими отказами.

В зависимости от причин возникновения отказа различают:

- **конструктивные отказы** (design failure), возникшие в результате нарушения установленных правил конструирования;

- **производственные отказы** (manufacturing failure), причиной возникновения которых является нарушение установленного процесса изготовления или ремонта изделия;

- **эксплуатационные отказы** (misuse failure, mishandling failure), причиной возникновения которых является нарушение установленных правил или условий эксплуатации машины.

Деградационный отказ (wear-out failure, ageing failure) — отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

По своей природе отказы могут быть:

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

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

Основными признаками классификации отказов являются:

- характер возникновения;
- причина возникновения;
- последствия отказов;
- возможность дальнейшего использования объекта;
- легкость обнаружения;
- время возникновения.

По характеру возникновения различают отказы внезапные, постепенные и перемежающиеся.

Внезапный отказ (sudden failure) характеризуется резким изменением одного или нескольких заданных параметров объекта. Примером внезапного отказа является нарушение работоспособности системы зажигания или системы питания двигателя.

Постепенный отказ (gradual failure) характеризуется постепенным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта. Характерным примером постепенного отказа является нарушение работоспособности тормозов в результате износа фрикционных элементов.

Перемежающийся отказ (intermittent failure) — многократно возникающий сбой одного и того же характера. Примером перемежающегося отказа может служить ухудшение мощностных и топливно-экономических показателей двигателя из-за появления нагара в головке блока цилиндров. Этот отказ часто самоустранивается при длительной работе машины в тяжелом нагрузочном режиме. Другим характерным примером перемежающегося отказа является временное нарушение работоспособности двигателя из-за случайного попадания воды в бензин.

По возможности дальнейшего использования объекта отказы могут быть полные или частичные. **Полный отказ** исключает возможность работы объекта до его устранения. При возникновении **частичного отказа** объект может частично использоваться.

В зависимости от способа устранения отказа все объекты разделяют на ремонтируемые (восстанавливаемые) и неремонтируемые (невосстанавливаемые). К **ремонтируемым** относят **объекты**, ремонт которых возможен и предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией. Такие объекты при возникновении отказа ремонтируют и после восстановления работоспособности снова вводят в эксплуатацию. Автомобильный транспорт, а также большинство их элементов являются ремонтируемыми объектами.

Неремонтируемые объекты после возникновения отказа заменяют. К числу неремонтируемых элементов дорожных машин относят подшипники качения, стальные канаты, оси, пальцы, кре-

пежные детали и т. д. Восстановление этих элементов экономически нецелесообразно, так как затраты на ремонт достаточно велики, а обеспечиваемая при этом долговечность значительно ниже, чем у новых деталей.

По признаку легкости обнаружения отказы бывают *очевидные* (явные) и *скрытые* (неявные).

По времени возникновения отказы подразделяются на *приработочные*, возникающие в начальный период эксплуатации, *отказы при нормальной эксплуатации*, *износостойкие отказы*, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и т. п.

Проводя некоторую аналогию между изделиями и человеком с позиций надежности, приработочные отказы сопоставляют с детскими болезнями, отказы при нормальной эксплуатации —

Таблица 2.2

Перечень характерных отказов автомобиля и его элементов

Характер отказа	Пример отказавших элементов
Износ	Рабочие органы, поверхности деталей в сопряжениях
Излом	Элементы металлоконструкций
Трещина	Рамы несущих конструкций
Срез резьбы	Резьбовые соединения
Потеря упругости	Пружины
Разрыв	Шланги, трубопроводы, ремни, цепи
Расслоение, растрескивание	Ремни, шланги
Нарушение герметичности	Гидравлические и пневматические системы
Пробоина	Баки
Потеря эластичности, старение	Резинотехнические изделия, уплотнения
Пробой, замыкание, нарушение контакта, электрические повреждения, подгорания	Элементы электропривода
Перегорание	Осветительная аппаратура
Несрабатывание	Приборы защиты и управления, элементы систем автоматики
Коррозия	Поверхности металлоконструкций

со случайными болезнями окрепшего организма взрослого человека, износосвые — со старческими болезнями. Отказы деталей и узлов в разных машинах и разных условиях могут иметь совершенно разные последствия. Последствия отказов нескольких автомобилей, имеющих в парке, при наличии ремонтного цеха могут быть устранены силами предприятия, а выполняемая работа на время ремонта распределена между другими машинами. Отказ станка, встроенного в автоматическую линию, или специального станка, установленного на заводе в одном экземпляре, дополнительно вызовет большие убытки, связанные с простоем многих других станков, невыполнением плана цехом и заводом. Отказ деталей самолета может вызвать аварию с человеческими жертвами.

Современный автомобиль состоит из 15—20 тыс. деталей, из которых 7—9 тыс. теряют начальные значения свойств, при этом около 3—4 тыс. деталей имеют срок службы меньший, чем срок службы автомобиля в целом. Примерно 150—300 деталей чаще других требуют замены и вызывают наибольшие простои автомобилей и в сумме наибольшие материальные затраты.

В табл. 2.2 показан перечень характерных отказов автомобиля и его элементов в процессе эксплуатации.

2.4. Основные понятия, термины и определения в области надежности

Надежность является комплексным свойством и включает в себя свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Рассмотрим классификацию основных понятий в области надежности в соответствии с ГОСТ 27.002—89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения»:

1) общие понятия:

- надежность;
- безотказность;
- долговечность;
- ремонтпригодность;
- сохраняемость;

2) состояния объекта:

- исправное состояние (исправность);
- неисправное состояние (неисправность);
- работоспособное состояние (работоспособность);
- неработоспособное состояние (неработоспособность);
- предельное состояние;
- критерий предельного состояния;

3) дефекты, повреждения, отказы:

- повреждение;

- отказ;
- критерий отказа;
- причина отказа;
- последствия отказа;
- критичность отказа;
- ресурсный отказ;
- независимый отказ;
- зависимый отказ;
- внезапный отказ;
- постепенный отказ;
- сбой;
- перемежающийся отказ;
- явный отказ;
- скрытый отказ;
- конструктивный отказ;
- производственный отказ;
- эксплуатационный отказ;
- деградационный отказ;

4) ***временные понятия:***

- наработка;
- наработка до отказа;
- наработка между отказами;
- время восстановления;
- ресурс;
- срок службы;
- срок сохраняемости;
- остаточный ресурс;
- назначенный ресурс;
- назначенный срок службы;
- назначенный срок хранения;

5) ***техническое обслуживание и ремонт, виды объектов:***

- техническое обслуживание;
- восстановление;
- ремонт;
- обслуживаемый объект;
- необслуживаемый объект;
- восстанавливаемый объект;
- невосстанавливаемый объект;
- ремонтируемый объект;
- неремонтируемый объект;

6) ***показатели надежности:***

- показатель надежности;
- единичный показатель надежности;
- комплексный показатель надежности;
- расчетный показатель надежности;
- экспериментальный показатель надежности;

- эксплуатационный показатель надежности;
- экстраполированный показатель надежности.

В зависимости от того, предусмотрены или не предусмотрены нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией для данного изделия операции технического обслуживания, изделия подразделяются на обслуживаемые и необслуживаемые, а в зависимости от того, предусмотрены или нет операции ремонта — на ремонтируемые и неремонтируемые. В зависимости от того, возможно или невозможно у данного изделия восстановление работоспособного состояния в рассматриваемой ситуации и (или) предусмотрено или не предусмотрено такое восстановление в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, они подразделяются на восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Одно и то же изделие может быть как восстанавливаемым, так и невосстанавливаемым в зависимости от его целевого назначения и условий использования. Например, для пилотов гоночных автомобилей в условиях соревнований коробка передач может рассматриваться как невосстанавливаемое изделие, а в обычных условиях движения — как восстанавливаемое.

Для количественной характеристики каждого из свойств надежности отдельного объекта служат такие временные понятия, как наработка, наработка до отказа, наработка между отказами, технический ресурс, срок службы, срок сохраняемости, время (трудоемкость) восстановления. Значения этих величин получают по данным эксплуатации или испытаний каждого отдельного объекта. Значения этих характеристик, полученные по экспериментальным данным, служат основой для последующего вычисления оценок таких показателей надежности, как средняя наработка на отказ, средний ресурс и др.

Наработка (operating time) — продолжительность или объем работы объекта (системы). Объект может работать непрерывно или с перерывами. Во втором случае учитывается суммарная наработка. Нарработка может измеряться в единицах времени, километрах пробега, циклах, единицах выработки и других единицах. В процессе эксплуатации различают суточную, месячную наработку, наработку до первого отказа, наработку между отказами, заданную наработку и т. д.

Если объект эксплуатируется в различных режимах нагрузки, то, например, наработка в облегченном режиме может быть выделена и учитываться отдельно от наработки при номинальной нагрузке.

Наработка до отказа (operating time to failure) — наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа.

Наработка между отказами (operating time between failures) — наработка объекта от окончания восстановления его работоспо-

собного состояния после отказа до возникновения следующего отказа.

Время восстановления (restoration time) — продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта.

Ресурс (useful life, life) — суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Обычно указывается, какой именно технический ресурс имеется в виду: до среднего, до капитального ремонта, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т.п. Если конкретного указания не содержится, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех (средних и капитальных) ремонтов, т.е. до списания по техническому состоянию.

Остаточный ресурс (residual life) — суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Аналогично вводятся понятия остаточной наработки до отказа, остаточного срока службы и остаточного срока хранения.

Назначенный ресурс (assigned operating time) — суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Срок службы (useful lifetime, lifetime) — календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Назначенный срок службы (assigned lifetime) — календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Под эксплуатацией объекта понимается стадия его существования в распоряжении потребителя при условии применения объекта по назначению, что может чередоваться с хранением, транспортированием, техническим обслуживанием и ремонтом, если это осуществляется потребителем.

Отличие технического ресурса от срока службы объекта заключается в том, что первый показатель является оценкой фактической наработки машины в часах или в единицах производимых работ без учета перерывов в работе и простоев, в то время как срок службы характеризует продолжительность существования машины с момента ввода в эксплуатацию независимо от характера ее использования.

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



Рис. 2.2. Основные свойства технических систем

Назначенный срок хранения (assigned storage time) — календарная продолжительность хранения, при достижении которой хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

По истечении назначенного ресурса (срока службы, срока хранения) объект должен быть изъят из эксплуатации и должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей нормативно-технической документацией: направление в ремонт, списание, уничтожение, проверка и установление нового назначенного срока и т.д.

Работа любой технической системы может характеризоваться ее эффективностью (рис. 2.2), под которой понимается совокупность свойств, определяющих способность системы выполнять определенные задачи.

2.5. Показатели надежности

Показатель надежности (reliability measure) — количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Значения показателей надежности могут быть нормативными и фактическими и определяться расчетным методом (расчетный показатель надежности), по данным испытаний (экспериментальный показатель), по данным эксплуатации (эксплуатационный

показатель) или путем экстраполирования (экстраполированный показатель).

Для показателей надежности используются две формы представления: вероятностная и статистическая. *Вероятностная* форма обычно бывает удобнее при априорных аналитических расчетах надежности, *статистическая* — при экспериментальном исследовании надежности технических систем. Кроме того, оказывается, что одни показатели лучше интерпретируются в вероятностных терминах, а другие — в статистических.

Нормативные значения показателей надежности устанавливаются в технической документации. Они являются детерминированными величинами. Автомобиль должен быть спроектирован и изготовлен таким образом, чтобы при установленных режимах эксплуатации фактические значения показателей надежности были не хуже нормативных. Фактические значения показателей надежности являются величинами случайными.

Показатели надежности подразделяют на четыре группы (рис. 2.3): показатели безопасности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости. Кроме этого существуют комплексные показатели, характеризующие несколько свойств, составляющих надежность объекта.

Единый показатель надежности (simple reliability measure) — показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта.

Комплексный показатель надежности (integrated reliability measure) — показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность объекта.

Расчетный показатель надежности (predicted reliability measure) — показатель надежности, значения которого определяются расчетным методом.

Экспериментальный показатель надежности (assessed reliability measure) — показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний.

Эксплуатационный показатель надежности (observed reliability measure) — показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации.

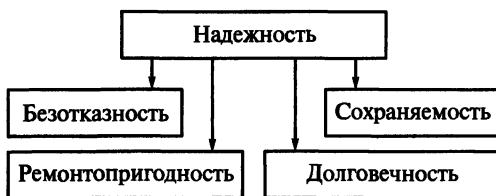


Рис. 2.3. Классификация свойств надежности машин и их элементов

Экстраполированный показатель надежности (extrapolated reliability measure) — показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

Надежность — важнейшее свойство качества объекта, которое нельзя ни противопоставлять, ни смешивать с другими свойствами и показателями качества.

Надежность в общем случае — комплексное свойство, включающее такие понятия, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Для конкретных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость.

Безотказность (reliability, failure-free operation) — это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Ремонтпригодность (maintainability) — это свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Долговечность (durability, longevity) — это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость (storability) — это свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Для количественной характеристики надежности используются показатели надежности. Их классификация приведена в табл. 2.3.

Единичные показатели характеризуют одно из свойств надежности и в зависимости от этого подразделяются на показатели безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтпригодности.

Комплексные показатели характеризуют одновременно несколько свойств. Номенклатура основных показателей приведена в табл. 2.4.

По методу получения различают следующие показатели:

- расчетные, получаемые на основе расчетных методов;
- экспериментальные, определяемые по данным испытаний;
- эксплуатационные, получаемые по данным эксплуатации;
- экстраполированные, получаемые методами экстраполирования на различные условия эксплуатации или на большую продолжительность эксплуатации (наработки).

Классификация показателей надежности

Признак	Показатель
Число характеризующих свойств надежности	Единичный Комплексный
Свойство надежности	Безотказность Долговечность Сохраняемость Ремонтопригодность
Метод получения	Расчетный Экспериментальный Эксплуатационный Экстраполированный
Область использования	Нормативный Оценочный
Область распространения	Индивидуальный Групповой

По области использования показатели надежности могут подразделяться на нормативные и оценочные. *Нормативными* называют показатели надежности, регламентированные в нормативно-технической или конструкторской документации. В качестве нормативного может выступить любой из приведенных в табл. 2.4 показателей. К *оценочным* относятся показатели, используемые для различных сравнительных оценок при научно-исследовательских и проектно-технологических разработках. К оценочным относятся фактические значения показателей надежности опытных образцов и серийной продукции, получаемые по результатам испытаний по данным эксплуатации.

По области распространения показатели надежности подразделяются на индивидуальные и групповые. К *индивидуальным* относятся такие показатели надежности, используя которые можно по результатам испытаний или эксплуатации делать вывод о соответствии или не соответствии данного объекта регламентированным требованиям по надежности. Индивидуальными показателями надежности являются установленная безотказная наработка, установленный ресурс (срок службы), назначенный ресурс.

К индивидуальным могут относиться и такие показатели, как средняя наработка на отказ, параметр потока отказов, коэффициент технического использования, если при нормировании этих показателей указывается, что они должны обеспечиваться для каждого изделия.

Номенклатура показателей надежности

Характеризуемые свойства надежности	Показатель	Обозначение
Единичные: безотказность долговечность сохраняемость ремонтпри- годность	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$
	Установленная безотказная наработка	T_y
	Средняя наработка на отказ	T_o
	Средняя наработка до отказа	T_{cp}
	Параметр потока отказов	$\omega(t)$
	Гамма-процентная наработка до отказа	T_γ
	Средний ресурс	T_p
	Гамма-процентный ресурс	$T_{p\gamma}$
	Назначенный ресурс	$T_{p.n}$
	Установленный ресурс (ресурс)	$T_{p.y}$
	Средний срок службы	T_{cl}
	Гамма-процентный срок службы	T_γ
	Назначенный срок службы	$T_{cl.n}$
	Установленный срок службы (срок службы)	$T_{cl.y}$
	Средний срок сохраняемости	T_c
	Гамма-процентный срок сохраняемости	$T_{c\gamma}$
	Назначенный срок хранения	$T_{c.n}$
	Установленный срок сохраняемости (срок сохраняемости)	$T_{c.y}$
	Среднее время восстановления работоспособного состояния	T_b
Комплексные	Вероятность восстановления работоспособного состояния	$P_b(t)$
	Коэффициент сохранения эффективности	$K_{эф}$
	Коэффициент оперативной готовности	$K_{o.g}$
	Коэффициент технического использования	$K_{т.и}$
	Коэффициент готовности	K_g
	Удельная суммарная трудоемкость технических обслуживаний	S
	Удельная суммарная трудоемкость ремонтов	$S_{т.o} (S_p)$

Показатели, на основе которых вывод о соответствии регламентированным требованиям можно делать только относительно некоторой совокупности (партии) изделий, называют *групповыми*. Как правило, индивидуальные показатели надежности являются одновременно и нормативными.

2.6. Критерии надежности невосстанавливаемых систем

Отказ элемента является событием случайным, а время ξ до его возникновения — случайной величиной. Основной характеристикой надежности элемента является функция распределения продолжительности его безотказной работы $\Sigma(t) = P(\xi < t)$, определенная при $t \geq 0$. На ее основе могут быть получены следующие показатели надежности невосстанавливаемого элемента:

- $P(t)$ — вероятность его безотказной работы в течение времени t ;
- $F(t) = 1 - P(t)$ — вероятность отказа в течение времени t ;
- $T_{\text{ср}}$ — среднее время безотказной работы (средняя наработка до отказа);
- $f(t)$ — плотность распределения времени безотказной работы;
- $\lambda(t)$ — интенсивность отказа в момент времени t ;
- $\Lambda(t)$ — функция ресурса;
- Γ_{py} — гамма-процентный ресурс, представляющий собой суммарную наработку, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Рассмотрим эти показатели более подробно. Приведем вероятностные и статистические определения, укажем на их свойства, достоинства и недостатки.

К показателям безотказности относятся вероятность безотказной работы $P(t)$, средняя наработка до отказа $T_{\text{ср}}$, средняя наработка на отказ T_0 , интенсивность отказов $\lambda(t)$, параметр потока отказов $\omega(t)$.

Вероятностью безотказной работы (reliability function, survival function) называется вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет, т. е. технический объект не откажет в течение времени t или что время ξ работы до отказа технического объекта больше времени его функционирования t :

$$P(t) = P(\xi > t). \quad (2.1)$$

Вероятность безотказной работы является убывающей функцией времени, имеющей следующие свойства:

$$0 \leq P(t) \leq 1, P(0) = 1, P(+\infty) = 0.$$

Вероятность безотказной работы имеет следующие достоинства:

- характеризует надежность во времени, являясь интервальной оценкой;
- определяет многие важные показатели техники, например эффективность, безопасность, живучесть, риск;
- сравнительно просто вычисляется и определяется по статистическим данным об отказах техники;

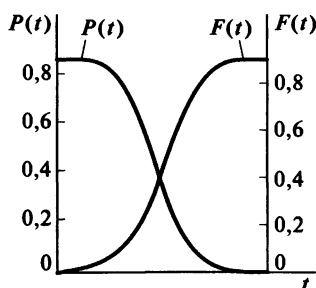


Рис. 2.4. Вероятности безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$

- достаточно полно характеризует надежность невосстанавливаемой техники.

Основной недостаток этого критерия — ограниченность применения. Вероятность безотказной работы характеризует надежность невосстанавливаемой техники или восстанавливаемой до первого ее отказа.

Если считать, что машина может находиться только в одном из двух состояний, относящихся к работоспособности (работоспособном или неработоспособном), то вероятность безотказной работы $P(t)$ можно связать с вероятностью отказа следующими соотношениями:

$$P(t) + F(t) = 1; P(t) = 1 - F(t), \quad (2.2)$$

где $F(t)$ — вероятность отказа, равная вероятности того, что наработка до отказа будет меньше текущего значения t .

Графическое изображение вероятностей безотказной работы и отказа представлено на рис. 2.4.

Вероятность безотказной работы обладает следующими основными свойствами:

- в начальный момент времени $P(0) = 1$, так как рассматривается безотказность тех элементов, которые были работоспособны в момент начала наблюдения;

- $P(t)$ монотонно убывающая функция, так как надежность всех изделий со временем падает и при $t \rightarrow \infty$ функции $P(t) \rightarrow 0$, т.е. любой объект со временем откажет.

Функцию $P(t)$ часто называют *функцией надежности*. Плотность распределения наработки до отказа связана с вероятностью безотказной работы соотношением

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

По статистическим данным об отказах, полученным из эксперимента или эксплуатации, функция $P(t)$ определяется следующей статистической оценкой:

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (2.3)$$

где N_0 — общее число образцов, находящихся на испытании; $N(t)$ — число исправно работающих образцов в момент времени t ; $n(t)$ — число отказавших образцов в течение времени t . Здесь и далее звездочкой обозначаются величины, полученные по статистическим данным.

Пример 2.1. В течение месяца наблюдение велось за 10 автомобилями. За период наблюдения отказал 1 автомобиль. Определить вероятность безотказной работы за период наблюдения и вероятность отказа.

Решение. $N_0 = 10$; $n = 1$; $N = 9$; $P(t) = \frac{10-1}{10} = 0,9$; $F(t) = 1 - 0,9 = 0,1$.

Гамма-процентная наработка до отказа (gamma-percentile operating time to failure) — наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средняя наработка до отказа T_{cp} (mean operating time to failure) применяется к невосстанавливаемым техническим объектам и является численной характеристикой, равной математическому ожиданию наработки объекта от начала эксплуатации до первого отказа; определяется по общему правилу нахождения математического ожидания случайной величины:

$$T_{cp} = M(\xi). \quad (2.4)$$

Средняя наработка на отказ (наработка на отказ) T_0 (mean operating time between failures) применяется для восстанавливаемых объектов и определяется как отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Статистическая оценка T_{cp} и T_0 для невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов может быть получена по результатам наблюдения за эксплуатацией машин следующей зависимостью:

$$T'_{cp} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i, \quad (2.5)$$

где N_0 — число испытываемых образцов техники; t_i — время безотказной работы i -го образца.

Среднее время безотказной работы вычисляется как математическое ожидание случайной величины с плотностью $f(t)$ по формуле

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (2.6)$$

Интегрируя выражение (2.6) по частям, получим

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t P'(t) dt = -t P(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Первое слагаемое равно нулю, так как $P(0) = 1$, $P(+\infty) = 0$, и тогда выражение для $T_{\text{ср}}$ будет иметь вид

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.7)$$

Среднее время безотказной работы является интегральным показателем надежности. Его основное достоинство — высокая наглядность. Недостаток этого показателя в том, что он, будучи интегральным, характеризует надежность техники длительного времени работы.

Таким образом, средняя наработка $T_{\text{ср}}$ равна площади под кривой $P(t)$ (см. рис. 2.4).

Плотность распределения времени безотказной работы (частота отказов) $f(t)$ — это плотность распределения случайной величины ξ , наиболее полно характеризует надежность техники в данный момент (точечная характеристика). По ней можно определить любой показатель надежности невосстанавливаемой системы. В этом основное достоинство плотности распределения времени безотказной работы.

Статистически $f(t)$ определяется отношением числа отказавших образцов техники в единицу времени к числу испытываемых образцов при условии, что отказавшие образцы не восполняются исправными:

$$f^*(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (2.8)$$

где $n(t, t + \Delta t)$ — число отказавших образцов за промежуток времени $[t, t + \Delta t]$; N_0 — число образцов, первоначально поставленных на испытания.

Действительно, если $f(t) = F'(t) = -P'(t)$, то для малых значений имеем $f^*(t) = \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{\Delta t}$.

Пусть $N(t)$ — число исправно работающих образцов к моменту времени t ; $N(t + \Delta t)$ — число образцов, исправно работающих к моменту $t + \Delta t$. Поскольку

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

$$f^*(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N_0 \Delta t},$$

что совпадает с выражением (2.8), так как $N(t) - N(t + \Delta t) = n(t, t + \Delta t)$.

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

Интенсивность отказов используют для характеристики безотказности невосстанавливаемых технических объектов и определяют как отношение плотности распределения к вероятности безотказной работы объекта:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (2.9)$$

Другими словами, интенсивность отказов характеризует долю изделий, отказывающих в единицу времени, начиная с момента времени t , отнесенную к числу изделий, работоспособных в момент t .

Интенсивность отказов оценивают по следующей формуле:

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

где $N(t)$ — число работоспособных объектов в момент времени t ; Δt — достаточно малый интервал времени; ΔN — число отказов за период Δt .

Статистически интенсивность отказов есть отношение числа отказавших образцов техники в единицу времени к среднему числу образцов, исправно работающих на интервале $[t, t + \Delta t]$:

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N_{\text{ср}} \Delta t}, \quad (2.10)$$

где n — число отказавших элементов за тот же интервал времени;

$N_{\text{ср}}(\Delta t) = \frac{N(t) + N(t + \Delta t)}{2}$ — среднее число исправно работающих образцов на интервале $[t, t + \Delta t]$.

Соотношение (2.10) для малых Δt следует непосредственно из формул (2.3) и (2.8).

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью

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

или

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (2.11)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ является основным показателем надежности элементов сложных систем. Это объясняется следующими обстоятельствами:

- надежность многих элементов можно оценить одним числом, так как интенсивность отказа элементов в период нормальной эксплуатации машины — величина постоянная;
- по известной интенсивности $\lambda(t)$ наиболее просто оценить остальные показатели надежности как элементов, так и сложных систем;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$ обладает хорошей наглядностью;
- интенсивность отказов нетрудно получить экспериментально.

Интенсивность отказов может изменять свое значение в периоды приработки и старения машины. Опыт эксплуатации сложных систем показывает, что изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$ большого числа объектов описывается U-образной кривой (рис. 2.5). Время можно условно разделить на три характерных периода: приработки, нормальной эксплуатации, старения объекта.

Для изучения интенсивности отказов в период нормальной эксплуатации машины чаще применяют экспоненциальный и усеченный нормальный законы распределения.

В период приработки интенсивность отказов чаще подчиняется закону распределения Вейбулла, а в период старения объекта — нормальному закону распределения. Более подробно законы распределения, наиболее часто используемые в теории надежности, рассматриваются в подразд. 3.4.

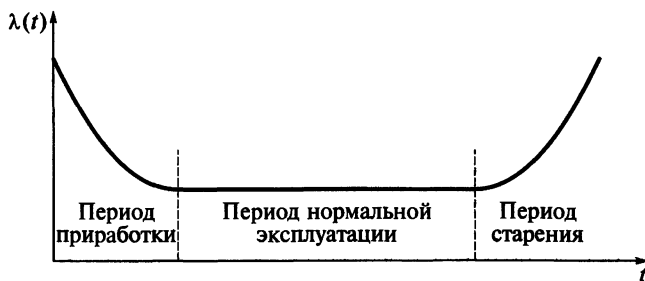


Рис. 2.5. U-образная кривая интенсивности отказов, характерная для большинства машин

Период приработки объекта имеет повышенную интенсивность отказов, вызванную приработочными отказами, обусловленными дефектами производства, монтажа и наладки. Иногда с продолжительностью этого периода связывают сроки гарантийного обслуживания объекта, когда устранение отказов производится изготовителем. В период нормальной эксплуатации интенсивность отказов практически остается постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего из-за случайных изменений нагрузки, несоблюдения условий эксплуатации, неблагоприятных внешних факторов и т. п. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации объекта. Возрастание интенсивности отказов может наблюдаться в период старения объекта, что вызвано увеличением числа отказов из-за износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией.

Итак, между показателями надежности существуют следующие зависимости:

$$P(t) = \bar{F}(t) = 1 - F(t); \quad (2.12)$$

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} = e^{-\Lambda(t)}; \quad (2.13)$$

$$f(t) = -P'(t); \quad (2.14)$$

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx = \int_0^{\infty} f(x+t) dx; \quad (2.15)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}; \quad (2.16)$$

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} tf(t) dt; \quad (2.17)$$

$$\Lambda(t) = -\ln P(t) = \int_0^t \lambda(x) dx; \quad (2.18)$$

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}. \quad (2.19)$$

Пример 2.2. На испытании находилось $N_0 = 100$ автомобилей. Данные об их отказах приведены в первых трех строках табл. 2.5.

Таблица 2.5

Исходные данные об отказах

Параметр	Интервал, ч							
	0...100	100...200	200...300	300...400	400...500	500...600	600...700	700...800
Промежуток времени Δt , ч	100	100	100	100	100	100	100	100
Число отказавших автомобилей $n(t, t + \Delta t)$	1	2	1	3	2	2	1	3
$P(t)$	0,99	0,97	0,96	0,93	0,91	0,89	0,88	0,85
$f(t) \cdot 10^4$, ч ⁻¹	1	2	1	3	2	2	1	3
$\lambda(t) \cdot 10^4$, ч ⁻¹	1,01	2,03	1,04	3,17	2,20	2,22	1,12	3,47

Необходимо вычислить показатели надежности: $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, T_1 .

Решение. Вычислим интенсивность $P(t)$. Будем иметь в виду, что нам достоверно неизвестен момент отказа на промежутке длины Δt . Поэтому будем предполагать, что отказы происходят в середине этого промежутка, т. е. в моменты времени $t = 50; 150; 250$ ч и т. д. На первом интервале произошел один отказ. Тогда согласно формуле (2.3) вероятность безотказной работы

$$P(50) = \frac{N_0 - n(100)}{N_0} = \frac{100 - 1}{100} = 0,99.$$

На втором участке произошло 2 отказа, а всего за два периода длины Δt — 3 отказа. Тогда

$$P(150) = \frac{N_0 - n(200)}{N_0} = \frac{100 - 3}{100} = 0,97.$$

Результаты расчетов приведены в четвертой строке табл. 2.5. Вычисления значений $f(t)$ выполним по формуле (2.8):

$$f(50) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N_0 \Delta t} = \frac{1}{100 \cdot 100} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1};$$

$$f(150) = \frac{2}{100 \cdot 100} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$$

и т. д.

В данном случае число отказов на промежутке длины Δt не суммируется с числом отказов на предыдущих участках, так как функция $f(t)$ является точечной. Результаты расчетов приведены в пятой строке табл. 2.5. Вычислим значения $\lambda(t)$, воспользовавшись выражением (2.10). На пер-

вом участке произошел один отказ, при этом в начале участка число исправных автомобилей $N(0) = N_0 = 100$, а в конце участка $N(100) = N_0 - 1 = 99$. Тогда

$$\lambda(50) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N_{\text{ср}} \Delta t} = \frac{1}{\frac{100 + 99}{2} 100} = 1,01 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

Аналогично на втором участке

$$\lambda(150) = \frac{2}{\frac{99 + 97}{2} 100} = 2,03 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$$

и т.д. Значения $\lambda(t)$ приведены в последней строке табл. 2.5. Вычислим среднее время безотказной работы по формуле (2.8):

$$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1 \cdot 50 + 2 \cdot 150 + 1 \cdot 250 + 3 \cdot 350 + 2 \cdot 450 + 2 \cdot 550 + 1 \cdot 650 + 3 \cdot 750}{15} = 437 \text{ ч.}$$

В данном случае испытания закончены при отказе 15 из 100 образцов.

Очевидно, что полученный результат существенно ниже действительного значения среднего времени безотказной работы как математического ожидания случайной величины.

Пример 2.3. На 10 автомобилях лампы накаливания у фар перегорали через следующее число часов наработки: 1 600; 1 800; 1 500; 2 000; 2 200; 2 100; 2 000; 2 000; 2 100; 1 900.

Определить среднюю наработку до отказа для лампы накаливания.

Решение. $N_0 = 10$; $t_i = 1\,600$; $1\,800$; $1\,500$; $2\,000$; $2\,200$; $2\,100$; $2\,000$; $2\,000$; $2\,100$; $1\,900$.

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} 1\,600 + 1\,800 + 1\,500 + 2\,000 + 2\,200 + 2\,100 + 2\,000 + 2\,000 + 2\,100 + 1\,900 = 1\,920 \text{ ч.}$$

Пример 2.4. На пяти автомобилях в течение года наблюдалось следующее количество отказов: 1, 3, 2, 2, 1. При этом наработка (пробег) автомобилей за данный период составила соответственно 18 000; 20 000; 21 000; 25 000; 16 000 км.

Определить среднюю наработку на отказ автомобиля за год.

Решение. $n = 1 + 3 + 2 + 2 + 1 = 9$;

$$T_0 = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 18\,000 + 20\,000 + 21\,000 + 25\,000 + 16\,000 = 11\,111 \text{ км.}$$

Пример 2.5. В начальный период наблюдения все четыре колеса автомобиля были работоспособны, однако через 10 тыс. км одна покрышка колеса износилась без возможности ее восстановления.

Определить интенсивность отказов колес автомобиля.

Решение. $N(t) = 4$; $N(t = 10) = 3$; $\Delta N = 1$; $t = 10$ тыс. км;

$$\lambda(t) = \frac{4 - 3}{10 \cdot 4} = 0,025 \text{ тыс. км}^{-1}.$$

2.7. Критерии надежности восстанавливаемых систем

Показателями надежности восстанавливаемых элементов и систем могут быть также показатели надежности невосстанавливаемых элементов. Это имеет место в тех случаях, когда система, в состав которой входит элемент, является неремонтируемой по условиям ее работы (отсутствие запасных частей для ремонта автомобиля, отказ какого-либо электронного блока систем управления автомобиля, элементов и систем, работающих в агрессивных средах и т. п.).

Надежность восстанавливаемых объектов оценивают следующими показателями:

- T — среднее время работы между отказами (средняя наработка на отказ);
- T_v — среднее время восстановления;
- $\omega(t)$ — параметр потока отказов;
- $K_t(t)$ — функция готовности — вероятность того, что система исправна в момент t ;
- $K_{\Pi}(t)$ — функция простоя, это вероятность того, что в момент t система неисправна и восстанавливается;
- K_T — коэффициент готовности — вероятность того, что система будет исправной при длительной эксплуатации (стационарный режим);
- K_{Π} — коэффициент простоя — вероятность того, что система будет неисправной при длительной эксплуатации.

Рассмотрим эти показатели несколько подробнее.

Средняя наработка на отказ T определяется отношением средней суммарной наработки к среднему числу отказов при длительной работе объекта.

Среднее время восстановления T_v определяется отношением среднего суммарного времени восстановления к среднему числу восстановлений при длительной работе объекта.

По статистическим данным среднее время между отказами вычисляется по формуле (2.5).

Параметр потока отказов $\omega(t)$ (failure intensity) — отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки:

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

где $n_i(t)$ — число отказов i -го объекта за наработку t ; $\Delta(t)$ — достаточно малый промежуток времени; N — число испытываемых (наблюдаемых) объектов.

Параметр потока отказов обладает следующими свойствами.

1. В случае экспоненциального закона времени работы объекта с параметром λ и мгновенного восстановления $\omega(t) = \lambda$.

2. При мгновенном восстановлении предел, к которому стремится параметр потока отказов при $t \rightarrow \infty$, равен величине, об-

ратной среднему времени безотказной работы, т. е. $\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \frac{1}{T}$.

3. При мгновенном восстановлении параметр потока отказов и плотность распределения времени до отказа связаны следующим интегральным уравнением Вольтерра второго рода:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) d\tau.$$

Это уравнение устанавливает зависимость между показателями надежности восстанавливаемой и невосстанавливаемой техники. Оно позволяет определить по статистическим данным об отказах восстанавливаемой техники в процессе ее эксплуатации показатели надежности невосстанавливаемой техники.

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

В течение срока службы параметр потока отказов изменяется примерно так же, как и интенсивность отказов.

Пример 2.6. В течение месяца наблюдались пять автомобилей маршрутных такси («ГАЗель»). В начальный момент наблюдения один из автомобилей был неработоспособен (отказ). За 200 ч наблюдения были зафиксированы отказы еще двух автомобилей.

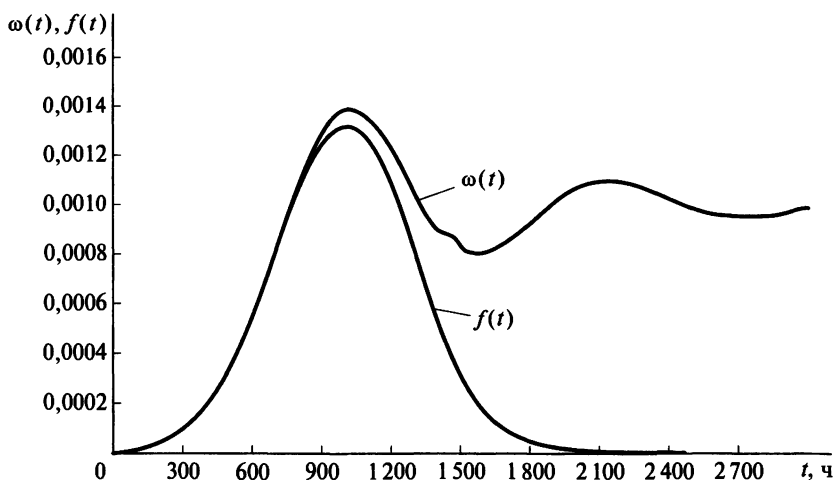


Рис. 2.6. Графики плотности распределения $f(t)$ и параметра потока отказов $\omega(t)$

Определить параметр потока отказов.

Решение. $\sum_1^5 n(t) = 1$; $\sum_1^5 n(t + \Delta t) = 1 + 2 = 3$; $\Delta t = 500$ ч, $N = 5$;

$$\omega(t) = \frac{3 - 1}{5 \cdot 200} = 0,002 \text{ маш./ч.}$$

Пример 2.7. Время до отказа объекта имеет нормальное распределение с математическим ожиданием $T = 1\,000$ ч и средним квадратическим отклонением $\sigma = 300$ ч.

Привести графическую иллюстрацию плотности распределения $f(t)$ и параметра потока отказов $\omega(t)$.

Решение. Графики функций изображены на рис. 2.6. Параметр потока отказов $\omega(t)$ получен путем численного решения уравнения Вольтерра.

Для относительно небольшого времени функционирования объекта параметр потока отказов близок к плотности распределения, но при длительной работе плотность распределения стремится к нулю, тогда как параметр потока отказов приближается к своему стационарному значению, равному $1/T = 0,001 \text{ ч}^{-1}$.

2.8. Показатели долговечности

Показатели долговечности чаще применяют для оценки надежности восстанавливаемых изделий, так как для невосстанавливаемых понятия долговечности и безотказности идентичны. В качестве показателей долговечности машин используют гамма-процентный

ресурс T_{py} , гамма-процентный срок службы $T_{сл\gamma}$, средний ресурс T_p , средний срок службы $T_{сл}$, межремонтный ресурс $T_{рем}$.

Гамма-процентный ресурс T_{py} (gamma-percentile life) — суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Другими словами, гамма-процентный ресурс показывает, что γ процентов машин данной модификации должны иметь наработку до предельного состояния не ниже величины T_{py} . Величина γ является регламентированной вероятностью

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

Если, например $\gamma = 80\%$, то соответствующий ресурс машины до предельного состояния называется восьмидесятипроцентным ресурсом. При назначенном 80%-ном ресурсе у автомобильных двигателей ЗМЗ 200 000 ч ($T_{80} = 200\,000$ ч) 8 из 10 двигателей должны иметь наработку до предельного состояния не менее 200 000 ч.

Гамма-процентный срок службы τ_γ (gamma-percentile lifetime) — календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах. По аналогии с гамма-процентным ресурсом

$$P(\tau_\gamma) = \frac{\gamma}{100}.$$

Средний ресурс T_p (mean life, mean useful life) — математическое ожидание ресурса, т. е. средняя величина наработки или срока службы до предельного состояния машины, узла, агрегата.

Средний срок службы $T_{сл}$ (mean life time) — математическое ожидание срока службы.

При использовании показателей долговечности следует указывать начало отсчета и вид действий после наступления предельного состояния (например, гамма-процентный ресурс от второго капитального ремонта до списания). Показатели долговечности, отсчитываемые от ввода объекта в эксплуатацию до окончательного снятия с эксплуатации, называются *гамма-процентный полный ресурс (срок службы), средний полный ресурс (срок службы)*.

2.9. Показатели сохраняемости

Показатели сохраняемости характеризуют свойство объекта сохранять показатели безотказности, долговечности и ремонтнопригодности в установленных пределах в процессе длительного хранения и транспортирования. К ним относят гамма-процент-

ный и средний сроки сохраняемости, определяемые аналогично показателям долговечности.

Большое внимание обеспечению сохраняемости уделяют при создании машин сезонного использования, сменного рабочего оборудования, резинотехнических изделий (рукавов, резиновых шлангов, пневматических камер и т.п.).

Гамма-процентный срок сохраняемости T_{γ} (gamma-percentile storage time) — срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средний срок сохраняемости T_c (mean storage time) — математическое ожидание срока сохраняемости.

2.10. Показатели ремонтпригодности

Вероятность восстановления $P_b(t)$ (probability of restoration, maintainability function) — вероятность того, что фактическое время восстановления работоспособного состояния объекта t_b^{Φ} не превысит заданного значения t_b^H , регламентированного нормативными документами:

$$P_b(t) = P(t_b^{\Phi} < t_b^H).$$

Данная величина характеризует приспособленность машины к проведению текущего ремонта.

Гамма-процентное время восстановления (gamma-percentile restoration time) — время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Среднее время восстановления T_b (mean restoration time) — математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа. Данный показатель характеризует продолжительность вынужденного простоя объекта, необходимого для поиска и устранения одного отказа.

При определении среднего времени восстановления оценивают свойство машины, а не организационно-технические факторы, влияющие на продолжительность простоя ее в ремонте. В данном случае учитывают только нормативную (технологическую) продолжительность ремонта.

Интенсивность восстановления ((instantaneous) restoration rate) — условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

Средняя трудоемкость восстановления (mean restoration man-hours, mean maintenance man-hours) — математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

Затраты времени и труда на проведение технического обслуживания и ремонтов с учетом конструктивных особенностей объекта, его технического состояния и условий эксплуатации характеризуются оперативными показателями ремонтпригодности.

2.11. Комплексные показатели надежности

Каждый из описанных в предыдущих подразделах показателей позволяет оценить лишь одну из сторон, одно из свойств надежности изделия. Для предварительной качественной оценки надежности иногда используют комплексные показатели, позволяющие одновременно оценить несколько важнейших свойств изделия. Данные показатели являются наиболее важными для восстанавливаемых элементов и систем.

Наиболее часто применяемыми на практике комплексными показателями надежности являются:

- коэффициент готовности K_r ;
- коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$;
- коэффициент технического использования $K_{ти}$;
- коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$.

Коэффициент готовности K_r (Instantaneous) availability function характеризует вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается, т. е.

$$K_r = \frac{T}{T + T_b}, \quad (2.20)$$

где T — средняя наработка на отказ; T_b — среднее время восстановления.

Пример 2.8. За наблюдаемый период автомобиль отказал 2 раза. Первая наработка на отказ составила 1 000 ч, вторая — 1 600 ч. Первый ремонт составил 4 ч, второй — 6 ч.

Определить коэффициент готовности.

Решение. $T = \frac{1\,000 + 1\,600}{2} = 1\,300$ ч; $T_b = \frac{4 + 6}{2} = 5$ ч;

$$K_r = \frac{1\,300}{1\,300 + 5} = 0,996.$$

Коэффициент готовности не учитывает затрат времени на проведение планового технического обслуживания и ремонтов.

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

Коэффициент технического использования $K_{т.и}$ (steady state availability factor) представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период, т.е.

$$K_{т.и} = \frac{T_c}{T_c + T_{т.о} + T_p}, \quad (2.21)$$

где T_c — суммарная наработка изделия, ч; $T_{т.о}$, T_p — продолжительность простоев машины при техническом обслуживании и в ремонте.

Из выражений (2.20) и (2.21) следует, что чем меньше среднее время восстановления и суммарные простои, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом, тем выше коэффициенты готовности и технического использования.

Пример 2.9. Для условий примера 2.8 определить коэффициент технического использования, если продолжительность простоев машины в плановых технических обслуживаниях и ремонтах за тот же период составила 50 ч.

Решение. $T_c = 1\,000 + 1\,600 = 2\,600$ ч;

$T_{т.о} + T_p = 4 + 6 + 50 = 60$ ч;

$$K_{т} = \frac{2\,600}{2\,600 + 60} = 0,977.$$

Так как коэффициент технического использования учитывает простой машины как в неплановых, так и в плановых технических обслуживаниях и ремонтах, то он всегда меньше коэффициента готовности.

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

Коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$ (efficiency ratio) — отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность экс-

плуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

Контрольные вопросы

1. Что является основной задачей теории надежности?
2. Дайте определение технической системе. Из каких элементов состоит автомобиль как техническая система?
3. Приведите примеры невосстанавливаемой (неремонтируемой) и восстанавливаемой (ремонтируемой) технической системы.
4. Что называется резервированием (redundancy) в технике?
5. Какие методы резервирования надежности вы знаете?
6. Что называют кратностью резервирования?
7. Назовите основные состояния объекта (технической системы).
8. Какие события в жизненном цикле технической системы называют словами «Повреждение» (damage) и «Отказ» (failure)?
9. Назовите признаки отказов и виды отказов технических объектов, установленные нормативно-технической документацией.
10. Что называется наработкой (operating time) объекта (системы) и какие виды наработки вы знаете?
11. Что называется временем восстановления (restoration time)?
12. Дайте определение понятию «технический ресурс» (useful life, life).
13. Чем срок службы (useful lifetime, lifetime) отличается от ресурса?
14. На какие группы можно подразделить показатели надежности?
15. Каковы основные критерии надежности невосстанавливаемых систем?
16. Назовите показатели ремонтпригодности.
17. Каковы достоинства и недостатки комплексных показателей надежности?

Сбор, анализ и обработка эксплуатационных данных о надежности изделий

3.1. Цели и задачи сбора информации и оценки надежности машин

Надежность машин и оборудования оценивают для определения их соответствия установленным требованиям путем сопоставления показателей долговечности, безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости исследуемого изделия с аналогичными показателями эталонного изделия. На основании результатов оценки надежности разрабатывают мероприятия по совершенствованию конструкции, технологии изготовления или технической эксплуатации машин.

Основной целью сбора информации является своевременное обеспечение полных, объективных и достоверных данных о надежности машин и их элементов в эксплуатации. Необходимым условием достижения поставленной цели является организация четкой системы сбора и обработки информации о надежности. Эта система должна охватывать организации и предприятия-разработчики, на которых проектируют машины и разрабатывают техническую документацию; заводы-изготовители; ремонтные предприятия и эксплуатационные организации.

Система сбора и обработки информации о надежности должна обеспечить:

- своевременное получение полных, сопоставимых и объективных данных о надежности машин, работающих в различных условиях эксплуатации;
- оперативную обработку статистических данных и представление результатов в форме, наиболее удобной для анализа надежности машин;
- учет и координацию мероприятий по повышению надежности, проводимых разработчиками, заводами-изготовителями и эксплуатационными организациями.

Характерной чертой эксплуатации машин является их использование в различных климатических зонах, дорожных условиях и при производстве работ различных видов. Срок службы основных

элементов машин достаточно велик и составляет 5—10 лет. Поэтому, если собирать и обрабатывать информацию пассивно, без строго научного обоснования и планирования, то исследования затянутся на многие годы и в результате не позволят определить показатели надежности с требуемой точностью из-за неоднородности статистических данных.

Сбор и анализ информации о надежности должны проводить высококвалифицированные специалисты, знакомые с основами теории надежности и математической статистики, конструкцией, технологией изготовления машин и правилами их технической эксплуатации.

Результаты сбора и обработки информации о надежности машин и оборудования должны обеспечить возможность решения следующих задач:

- нахождение причин возникновения отказов и неисправностей;
- выявление деталей, сборочных единиц и комплектующих изделий, лимитирующих надежность машин;
- установление и корректировку нормируемых показателей надежности машин и их элементов;
- обоснование норм расхода запасных частей, структуры ремонтного цикла и периодичности проведения технического обслуживания и ремонтов машин;
- выявление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность машин;
- определение экономической эффективности мероприятий по повышению надежности машин и их элементов.

Для всесторонней оценки надежности машин и оборудования используют различные источники и методы получения информации.

Система технического обслуживания и ремонта техники, а также порядок сбора и учета информации о надежности регламентированы ГОСТ 20857—75, ГОСТ 16468—70, ГОСТ 17510—72, ГОСТ 20307—74, на базе которых разработаны отраслевые стандарты, устанавливающие порядок и форму сбора эксплуатационной информации на автотранспортных предприятиях.

Основным источником информации о надежности автомобилей является специально организуемая *подконтрольная эксплуатация* или испытания в максимально приближенных к эксплуатационным условиям, оговоренных в нормативно-технической документации.

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

рольную эксплуатацию и эксплуатационные испытания на образцовых эксплуатационных предприятиях, называемых *опорными пунктами*.

Для всесторонней оценки надежности машин и оборудования используют различные источники и методы получения информации.

3.2. Принципы сбора и систематизации эксплуатационной информации о надежности изделий

Обеспечение надежности изделий в значительной степени связано с использованием информации о результатах эксплуатации самого изделия или его аналогов. Поэтому при создании новых изделий необходимо уделять внимание эффективной организации сбора и систематизации эксплуатационной информации, а также получению количественных показателей надежности путем ее статистической обработки.

Структура первичных данных о надежности и формы учетной документации должны обеспечить возможность решения перечисленных задач.

Для всесторонней оценки надежности машин необходимо в результате сбора информации получить полные сведения об объекте исследования, условиях его эксплуатации, характере отказов и способах их устранения.

Основные сведения о машине приведены в техническом паспорте: марка, завод-изготовитель, заводской номер, время изготовления, категория, наработка до начала наблюдений.

Каждый отказ машины в процессе наблюдений должен характеризоваться такими данными, как наработка элемента до отказа, дата появления отказа, наименование или номер отказавшего элемента, характер и внешнее проявление отказа, предполагаемая причина его возникновения, способ и время устранения отказа.

Все это необходимо фиксировать в учетной документации в форме таблиц систематизации отказов (используется в дальнейшем для проведения статистической обработки) и журналов наблюдений (учета наработки).

В общем случае для сбора и обработки информации о надежности предусмотрены следующие виды форм учетной документации:

- первичные формы учета эксплуатационной информации;
- формы-накопители эксплуатационной информации;
- формы записи результатов анализа надежности.

Первичными формами являются журналы учета наработок, неисправностей и отказов машин. В дальнейшем всю информацию фиксируют в формах-накопителях — картах-накопителях наработок, неисправностей и отказов.

Результаты статистической обработки и анализа информации о надежности машин заносят в сводный перечень оценок показателей надежности.

Для оценки трудоемкости и стоимости ТО и ремонта автотранспортных средств, расхода горючего и смазочных материалов, запасных частей ведут специальные сводные ведомости по каждому типу машин.

Формы учетной документации составлены так, чтобы обеспечить возможность машинной обработки информации.

Сбор информации о надежности машин и выбор метода получения информации зависят от характера поставленных задач и условий эксплуатации. К условиям эксплуатации относят климатические и дорожные условия, квалификацию обслуживающего персонала, обеспеченность горючим и смазочными материалами, запасными частями и др.

В зависимости от организации использования машин и ухода за их техническим состоянием различают подконтрольную, нормальную и рядовую эксплуатацию. Определение подконтрольной эксплуатации дано ранее. *Нормальной эксплуатацией* называют эксплуатацию, при которой соблюдают правила использования машин и ухода за ними, оговоренные в технической документации. *Рядовой эксплуатацией* называют эксплуатацию, проводимую с отклонениями от требований технической документации, вызванными, например, необходимостью проведения работ в сжатые сроки или в особо сложных условиях.

Основными методами сбора информации о надежности машин в эксплуатации являются:

- инструментальный метод;
- метод хронометража;
- метод периодических наблюдений;
- метод, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации.

Инструментальный метод позволяет получить объективную информацию в наиболее полном объеме. Информацию этим методом собирают, как правило, в условиях подконтрольной эксплуатации при испытаниях машин. В качестве технических средств сбора информации используют контрольно-измерительную аппаратуру и самопишущие приборы, устанавливаемые на исследуемой машине. Надежность элементов машины в этом случае оценивают по изменению их технического состояния. Основными недостатками этого метода сбора информации являются необходимость оснащения машины дорогостоящей измерительной аппаратурой, высокая сто-

имость исследований, ограниченный объем выборки наблюдаемых машин и организационные трудности, связанные с установкой аппаратуры и поддержанием ее в исправном состоянии, при проведении исследований в условиях рядовой эксплуатации.

Метод хронометража используют для определения чистого времени работы элементов машины. Суть метода заключается в том, что специалист-хронометрист с помощью секундомера фиксирует моменты начала и окончания работы машины или отдельных ее элементов. Для этого можно также использовать приборы, автоматически регистрирующие наработку исследуемых элементов машины. При сборе информации этот метод широко применяют в сочетании с другими методами.

Метод периодических наблюдений применяют в тех случаях, когда установить постоянное наблюдение за машиной (или группой машин) невозможно из-за удаленности объекта. Собирают информацию в этом случае на основании опроса водителей и результатов технической экспертизы, проводимой на автомобиле. При планировании периодических наблюдений интервал устанавливают не более средней наработки на отказ машины. Основным недостатком этого метода является низкая достоверность получаемых результатов.

Метод сбора информации, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации, применяют весьма широко. При условии добросовестного заполнения технической документации и содержания ее в образцовом порядке с помощью этого метода можно получить исходные данные для определения всех основных нормируемых показателей надежности. Так, например, по данным нарядов можно определить наработку, технический ресурс или срок службы до капитального ремонта машины. Основным недостатком этого метода, как и предыдущего, является низкая достоверность получаемых результатов.

Для повышения достоверности получаемых результатов при сборе информации целесообразно комбинировать приведенные методы. Это позволяет получить необходимую информацию в более короткие сроки в более полном объеме. Объединяют информацию, полученную из различных источников и разными способами, с помощью методов математической статистики.

3.3. Построение эмпирического распределения и статистическая оценка его параметров

После проверки качества исходных данных и соответствующей корректировки полученной сводки ее нижняя строка, деленная на общее число наблюдений, будет представлять собой статистический ряд, по которому производят расчет статистических пара-

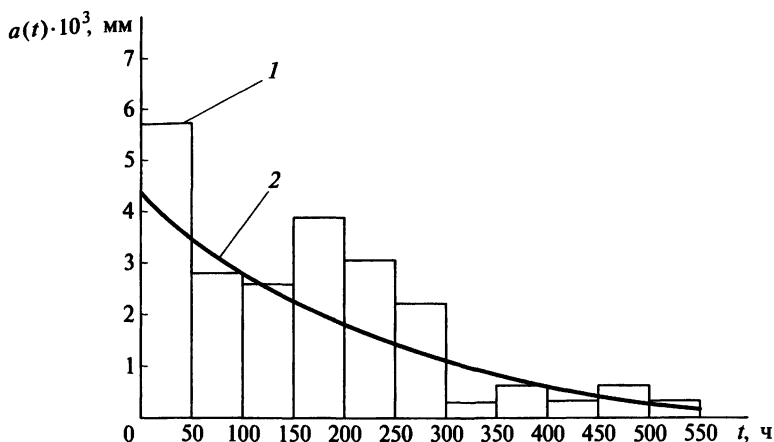


Рис. 3.1. Статистическая функция плотности эмпирического распределения:

1 — гистограмма распределения случайной величины; 2 — кривая распределения случайной величины

метров эмпирического распределения. Гистограмма, построенная на основе этого ряда, будет являться статистической функцией плотности распределения рассматриваемой случайной величины (рис. 3.1).

Как было сказано ранее, каждой числовой характеристике случайной величины соответствует ее статистический аналог. Статистические аналоги будем обозначать теми же буквами, что и соответствующие числовые характеристики, но со звездочкой. Для математического ожидания таким аналогом является среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины

$$T'_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i,$$

где t_i — i -е значение случайной величины; N — общее число значений.

Для статистического ряда среднее арифметическое находится из выражения

$$T'_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^N P_i^* \bar{t}_i,$$

где P_i^* — частота, $P_i^* = n_i / N$; \bar{t}_i — значение, соответствующее середине i -го интервала; n_i — число отказов.

Эту характеристику в дальнейшем будем называть *статистическим средним случайной величины*. Для характеристики рассеяния

таким аналогом является статистическая дисперсия случайной величины

$$D^*(t) = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - T^*)^2}{N - 1}$$

или статистическое среднее квадратическое отклонение

$$\sigma^*(t) = \sqrt{D^*(t)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - T^*)^2}{N - 1}};$$

для статистического ряда

$$\sigma^*(t) = \sqrt{\sum (t_i - T^*)^2 P_i^*}.$$

Статистический коэффициент вариации определяется по формуле

$$V^* = \frac{\sigma^*(t)}{T^*}.$$

При дальнейшей обработке необходимо решить вопрос о том, как подобрать для данных статистического ряда теоретическую кривую распределения, выражающую лишь существенные черты материала, а не случайности, связанные с недостаточным объемом экспериментальных данных.

Вид теоретического распределения, как правило, зависит от процессов, влияющих на изменение случайной величины. В некоторых случаях он выбирается просто по внешнему виду гистограммы. Найденные параметры эмпирического распределения подставляют в функцию теоретического распределения и рассчитывают вероятности появления случайной величины в интервалах (теоретические расчеты). Проверка согласованности экспериментальной и выравнивающей кривых часто производится по критерию Пирсона (критерию χ^2).

Распределение χ^2 дает возможность оценить степень согласия теоретического и статистического распределения.

По значениям t_i посредством таблицы нормального распределения устанавливают теоретические частоты. Критерий согласия χ^2 находится с помощью зависимости

$$\chi^2 = N \sum_{i=1}^k \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i}, \quad (3.1)$$

где k — число интервалов наработки; P_i — теоретическая частота случайной величины в интервале.

Результат определения критерия χ^2 записывается в таблицу.

Таким образом, схема применения критерия χ^2 при оценке согласия теоретического и статистического распределения сводится к определению:

- меры расхождения (по формуле (3.1));
- числа степеней свободы:

$$r = k(S + 1),$$

где S — число параметров теоретического распределения;

- табличного значения вероятности согласия P .

В случае аппроксимации экспоненциальным (показательным) законом распределения плотность распределения определяют из выражения:

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

где $\lambda = \text{const}$ — параметр распределения, равный интенсивности отказов.

Затем находят критерий согласия аналогично рассмотренному ранее примеру для закона нормального распределения.

При аппроксимации распределением Вейбулла плотность распределения рассчитывают по формуле

$$f(t) = abt^{b-1}e^{-at^b}, \quad t \geq 0.$$

По эмпирическим значениям случайной величины t вычисляют статистические параметры T'_{cp} , σ^* и коэффициент вариации V^* :

$$V^* = \frac{\sigma^*(t)}{T^*}.$$

По коэффициенту вариации определяют параметр b и коэффициенты K_b и C_b [12]. Связь параметра a с аналогами статистических характеристик находят из выражений

$$T'_{cp} = k_b a; \quad \sigma^* = c_b a.$$

Частоты статистического распределения определяют по формуле (3.1), а теоретические — по формуле

$$P_i = e^{at_i^b} - e^{at_{i-1}^b}, \quad i = 1, \dots, k,$$

где t_i — верхняя граница i -го интервала, причем $t_0 = 0$, $t_k = \infty$.

Кроме критерия Пирсона находят применение и другие критерии сходимости, например критерии Колмогорова, Фишера, Мизеса.

3.4. Законы распределения времени наработки до отказа, наиболее часто используемые в теории надежности

Приведем наиболее часто используемые в теории надежности параметрические семейства распределений случайной величины ξ , т.е. распределений, зависящих от одного или нескольких параметров.

Функция

$$\Phi(t) = 1 - e^{-\lambda t} \text{ при } t \geq 0$$

задает *экспоненциальное, или показательное, распределение*. Экспоненциальным законом распределения можно аппроксимировать время безотказной работы большого числа элементов. В первую очередь это относится к элементам радиоэлектронной аппаратуры, а также к машинам, эксплуатируемым в период после окончания приработки и до существенного проявления постепенных отказов. Экспоненциальное распределение применяется в областях, связанных с «временем жизни»: в медицине — продолжительность жизни больных, в надежности — продолжительность безотказной работы системы, в психологии — время, затраченное на выполнение тестовых задач. Оно используется в задачах массового обслуживания, в которых речь идет об интервалах времени между телефонными звонками, или между моментами поступления техники в ремонтную мастерскую, или между моментами обращения клиентов.

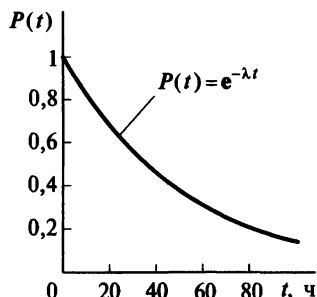
Это распределение имеет один параметр $\lambda = \frac{1}{T_{\text{ср}}}$, где $T_{\text{ср}}$ — средняя наработка элемента до отказа. Таким образом, параметр λ характеризует число отказов элемента в единицу времени и называется *интенсивностью отказов* (он имеет размерность времени). Плотность экспоненциального распределения задается как $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$.

Функция надежности $P(t) = e^{-\lambda t}$ определяет вероятность безотказной работы за время t (рис. 3.2). В данном случае интенсивность отказов есть величина постоянная ($\lambda(t) = \lambda$). Функция ресурса $\Lambda(t)$ для экспоненциального распределения является линейной, $\Lambda(t) = \lambda t$.

Значение гамма-процентного ресурса определяется по формуле

$$T_{\text{пр}} = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100}.$$

Рис. 3.2. Функция надежности
при $\lambda = 0,02 \text{ ч}^{-1}$



Пример 3.1. Время безотказной работы элемента подчинено экспоненциальному распределению с параметром $\lambda = 0,02 \text{ ч}^{-1}$.

Найти вероятность того, что элемент проработает безотказно в течение 10 ч и в течение 50 ч.

Решение. Используя функцию надежности $P(t) = e^{-\lambda t}$, получим:

$$P(10) = e^{-0,02 \cdot 10} = e^{-0,2} = 0,8187;$$

$$P(50) = e^{-0,02 \cdot 50} = e^{-1} = 0,3679.$$

Экспоненциальное распределение выделяется среди других распределений свойством «отсутствия памяти». Пусть X — время службы некоторого изделия с экспоненциальным законом распределения. «Отсутствие памяти» означает, что изделие, проработавшее время t , имеет такое же распределение, что и новое, только что начавшее работу. Математически это свойство выражается в виде следующего равенства:

$$P(X > t + x / X > t) = P(X > x)$$

для любых $t, x \geq 1$. Данное свойство как бы исключает износ и старение изделия.

Числовые характеристики экспоненциального распределения выражаются через его параметр: математическое ожидание $M(X) =$

$= 1/\lambda$, дисперсия $D(X) = \frac{1}{\lambda^2}$, среднее квадратическое отклонение

$$\sigma(X) = \frac{1}{\lambda}.$$

Итак, при экспоненциальном законе отказов, на основании формул (2.12) — (2.19), между показателями надежности невосстанавливаемых систем существуют следующие зависимости:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad T = \frac{1}{\lambda}; \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Для характеристики постепенных отказов обычно используют другие законы распределения.

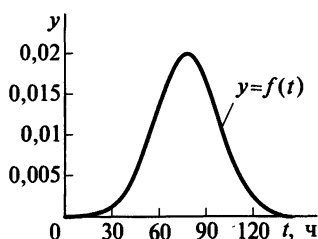


Рис. 3.3. Плотность нормального распределения с параметрами $m = 80$ ч, $\sigma = 20$ ч

Нормальное распределение (распределение Гаусса) определяется плотностью

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < t < +\infty,$$

и зависит от двух параметров — m и σ , которые являются соответственно математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением времени безотказной работы элемента. График плотности нормального распределения (кривая Гаусса) изображена на рис. 3.3.

Согласно закону больших чисел распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие примерно равнозначные факторы. Нормальному распределению подчиняются ошибки измерения деталей, отклонения дальности полета снарядов и т.п. При большом времени работы элемента и наличии восстановления среднее число отказов имеет асимптотически нормальное распределение.

Для нормального распределения функция надежности вычисляется по формуле

$$P(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{t-m}{\sigma}\right),$$

где $\Phi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ — функция Лапласа, значения которой приведены в таблицах [24, 29].

Пример 3.2. Время безотказной работы элемента подчинено нормальному распределению с параметрами $m = 80$ ч и $\sigma = 20$ ч.

Найти вероятность того, что элемент проработает безотказно в течение 60 ч.

Решение. Так как для нормального распределения функция надежности

$$P(t) = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{t-m}{\sigma}\right),$$

получим

$$P(60) = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{60-80}{20}\right) = 0,5 - \Phi_0(-1) = 0,5 + \Phi_0(1) = 0,8413.$$

Отметим важное свойство нормального распределения: сумма независимых случайных величин, имеющих нормальное распределение, также распределена по нормальному закону. При этом параметры суммы выражаются через параметры слагаемых: математическое ожидание суммы равно сумме математических ожиданий, дисперсия суммы равна сумме дисперсий.

На рис. 3.4 представлены графики интенсивности отказов $\lambda(t)$ для следующих параметров нормального распределения:

$m = 200$ ч и $\sigma = 100$ ч (кривая 1);

$m = 200$ ч и $\sigma = 80$ ч (кривая 2).

Усеченное нормальное распределение получается из нормального при ограничении интервала изменения случайной величины на промежуток $(0, +\infty)$. Плотность распределения записывается так же, как для нормального распределения, но с коэффициентом пропорциональности c :

$$f(t) = \frac{c}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_0)^2}{2\sigma_0^2}}.$$

Усеченное нормальное распределение зависит от двух параметров — m_0 и σ_0 , где m_0 — значение случайной величины, соответствующее максимальному значению $f(t)$ и называемое *модой*,

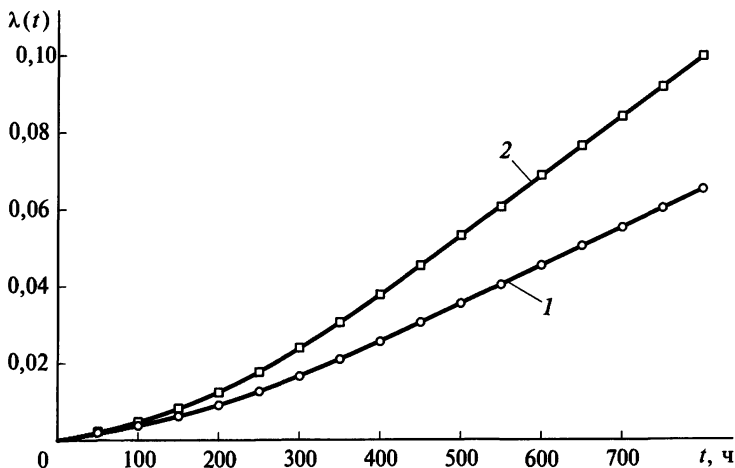


Рис. 3.4. Интенсивность отказов для нормального распределения при разных параметрах:

1 — при $m = 200$ ч и $\sigma = 100$ ч; 2 — при $m = 200$ ч и $\sigma = 80$ ч

σ_0 — среднее квадратическое отклонение. Коэффициент c определяется из условия нормирования:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1,$$

откуда

$$c = \frac{1}{0,5 + \Phi_0\left(\frac{m_0}{\sigma_0}\right)}.$$

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение усеченного нормального распределения определяются через параметры m_0 и σ_0 по формулам

$$m = m_0 + k\sigma_0; \quad \sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + k \frac{m_0}{\sigma_0} - k^2},$$

где $k = \frac{c}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{m_0^2}{2\sigma_0^2}}.$

В **логарифмически-нормальном распределении** логарифм случайной величины подчиняется нормальному закону с плотностью:

$$f(t) = \frac{1}{st\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2s^2}},$$

где μ и s — параметры распределения.

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение определяются в соответствии с формулами

$$m = \sqrt{e^{2\mu+s^2}}; \quad \sigma = \sqrt{e^{2\mu+s^2}(e^{s^2} - 1)}.$$

Логарифмически-нормальное распределение применяют, например, для описания наработки подшипников качения. Вообще, оно удобно для описания случайных величин, представляющих собой произведение достаточно большого числа случайных величин, подобно тому, как нормальное распределение описывает сумму большого числа случайных величин.

Плотность логарифмически-нормального распределения (рис. 3.5) описывается формулой

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - a)^2}{2\sigma^2}}, \quad t \geq 0, \quad (3.2)$$

где a — параметр распределения.

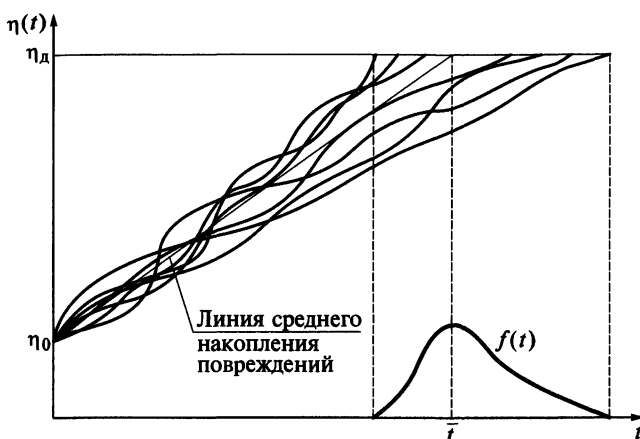


Рис. 3.5. Модель логарифмически-нормального распределения

Распределение Вейбулла является достаточно универсальным, благодаря возможности варьирования двух его параметров. Оно характеризуется плотностью распределения вероятностей:

$$f(t) = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha},$$

где α — параметр формы; β — параметр масштаба.

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение выражаются через параметры α и β следующим образом:

$$m = \beta \Gamma(1 + 1/\alpha); \quad \sigma = \beta \sqrt{\Gamma(1 + 2/\alpha) - \Gamma^2(1 + 1/\alpha)},$$

где Γ — гамма-функция, $\Gamma(t) = \int_0^{+\infty} x^{t-1} e^{-x} dx$.

Универсальность распределения Вейбулла объясняется следующим: при $\alpha = 1$ распределение превращается в экспоненциальное; при $\alpha < 1$ функции плотности и интенсивности отказов убывающие; при $\alpha > 1$ интенсивность отказов возрастающая; при $\alpha = 2$ функция $\lambda(t)$ линейная и распределение Вейбулла превращается в распределение Рэлея с плотностью $f(t) = 2\lambda t e^{-\lambda t^2}$, при $\alpha = 3,3$ распределение Вейбулла близко к нормальному.

Наряду с логарифмически-нормальным распределением, распределение Вейбулла хорошо описывает наработку деталей по усталостным разрушениям, наработку до отказа подшипников, а

также позволяет оценивать надежность деталей и узлов машин, в частности автомобилей и др.

Зависимости между показателями надежности в случае распределения Вейбулла имеют вид

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}}; T_1 = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right); \lambda = \frac{\alpha}{\beta^{\alpha}} t^{\alpha-1}.$$

На рис. 3.6 представлены графики интенсивности отказов $\lambda(t)$ для следующих параметров распределения Вейбулла:

$\alpha = 2$ и $\beta = 200$ ч (кривая 1);

$\alpha = 3$ и $\beta = 200$ ч (кривая 2).

Время работы до первого отказа механизма, состоящего из большого числа однотипных элементов, у которых отказ хотя бы одного из них приводит к отказу всего механизма, во многих случаях хорошо согласуется с законом Вейбулла, имеющим следующее выражение для плотности:

$$f(t) = abt^{b-1}e^{-at^b}, \quad t \geq 0, \quad (3.3)$$

где a, b — параметры распределения.

Гамма-распределение имеет плотность

$$f(t) = \frac{t^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} e^{-\frac{t}{\beta}}$$

с параметрами α и β . Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение связаны с этими параметрами соотношениями

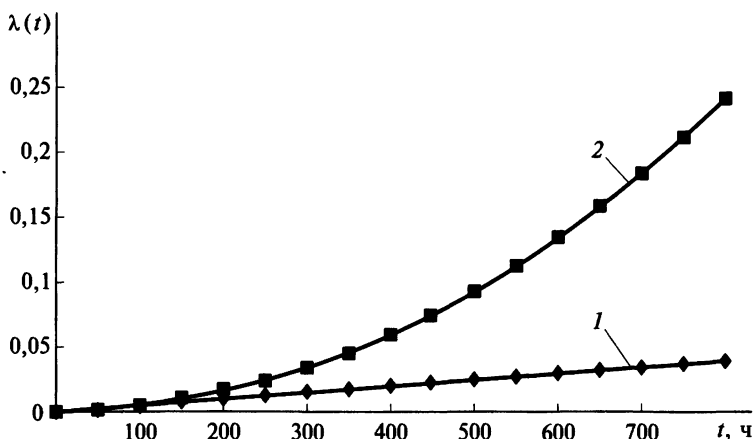


Рис. 3.6. Интенсивность отказов для распределения Вейбулла при разных параметрах:

1 — при $m = 200$ ч и $\sigma = 100$ ч; 2 — при $m = 200$ ч и $\sigma = 80$ ч

$$m = \alpha\beta; \quad \sigma = \sqrt{\alpha\beta}.$$

Вероятность безотказной работы элемента, имеющего гамма-распределение, выражается через интеграл

$$P(t) = \int_t^{\infty} \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} e^{-\frac{x}{\beta}} dx.$$

Параметр α , характеризующий асимметрию гамма-распределения, определяет вид характеристик надежности. При $\alpha > 1$ интенсивность отказа возрастает, при $\alpha < 1$ убывает, а при $\alpha = 1$ становится постоянной, т. е. гамма-распределение превращается в экспоненциальное.

При целом α гамма-распределение называется **распределением Эрланга** порядка α . Сумма α случайных величин, имеющих экспоненциальное распределение с параметром λ , имеет распределение Эрланга с параметрами α и $\beta = 1/\lambda$.

Вероятность безотказной работы элемента, имеющего распределение Эрланга, равна

$$P(t) = \sum_{i=0}^{\alpha-1} \frac{t^i}{i! \beta^i} e^{-\frac{t}{\beta}}.$$

Зависимости между показателями надежности в случае гамма-распределения имеют вид

$$P(t) = e^{-\frac{t}{\beta}} \sum_{i=0}^{\alpha-1} \frac{t^i}{\beta^i i!}; \quad T = \alpha\beta; \quad \lambda = \frac{t^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha) \sum_{i=0}^{\alpha-1} \frac{t^i}{\beta^i i!}}.$$

Смесь распределений определяется как линейная комбинация n других распределений, например распределение с плотностью

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i \lambda_i e^{-\lambda_i t},$$

где $\sum_{i=1}^n c_i = 1$. Такое распределение называется **гиперэкспоненциальным**.

Смесь гамма-распределений

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i \frac{t^{\alpha_i-1}}{\beta_i^{\alpha_i} \Gamma(\alpha_i)} e^{-\frac{t}{\beta_i}} \quad \text{при условии} \quad \sum_{i=1}^n c_i = 1$$

образует плотность обобщенного гамма-распределения и т. п.

Перечень полезных параметрических распределений можно продолжить. Например, если параметр λ экспоненциального распределения является случайной величиной, имеющей гамма-распределение с параметрами α и β , то в результате получается семейство распределений Парето с плотностью

$$f(t) = \frac{1}{(1 + \beta t)^\alpha}.$$

При расчете надежности ряда изделий (рессор, подшипников и т. п.) применяют семейства распределений с дополнительным параметром сдвига или смещения. Так, обобщением распределения Вейбулла является трехпараметрическое семейство распределений с плотностью:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\alpha(t - t_0)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} & \text{при } t > t_0; \\ 0 & \text{при } t \leq t_0. \end{cases}$$

Параметр сдвига t_0 интерпретируется как *гарантированное время безотказной работы*.

Если элемент имеет перерывы в работе, то закон распределения времени до его отказа изменяется. Пусть $\bar{P}_0(t)$ — вероятность безотказной работы элемента, если бы он работал непрерывно. Предположим далее, что на непересекающихся интервалах $[a_k, b_k]$, $k = 1, 2, \dots, n$ элемент простаивает, причем время простоя не влияет на его надежность. Тогда вероятность безотказной работы элемента при наличии интервалов простоя характеризуется параметрами смещения и выражается равенством:

$$\bar{P}(t) = \begin{cases} \bar{P}_0\left(t + \sum_{i=1}^{k-1} a_i - \sum_{i=1}^{k-1} b_i\right) & \text{при } b_{k-1} \leq t < a_k, \quad k = 1, 2, \dots, n+1; \\ \bar{P}_0\left(\sum_{i=1}^k a_i - \sum_{i=1}^{k-1} b_i\right) & \text{при } a_k \leq t < b_k, \quad k = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

Здесь принято, что $b_0 = 0$, $a_{n+1} = \infty$.

Пример 3.3. Предположим, что график вероятности безотказной работы элемента $y = \bar{P}_0(t)$ имеет вид, изображенный на рис. 3.7. Пусть этот элемент работает только на временных интервалах $[0; 10]$, $[30; 40]$, $[60; 70]$, ..., а на остальных интервалах элемент простаивает.

Определить вероятность безотказной работы элемента $y = \bar{P}(t)$ с учетом простоя.

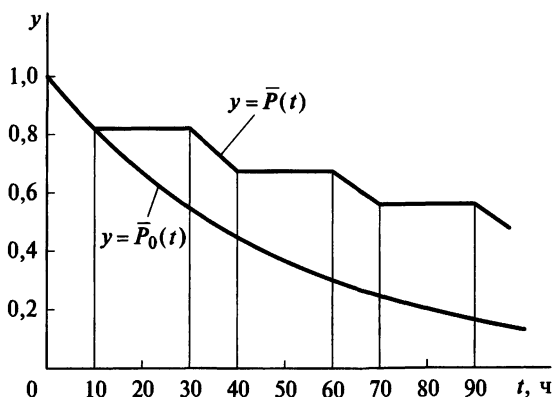


Рис. 3.7. Закон распределения времени до отказа при наличии перерывов в работе

Решение. График искомой функции $y = \bar{P}_0(t)$ изображен на рис. 3.7. На интервалах простоя вероятность безотказной работы не уменьшается (функция постоянна), а график $y = \bar{P}_0(t)$ смещается вправо на величину, равную суммарному времени простоя элемента.

Заметим, что интервалы простоя могут быть как детерминированными, так и случайными. В последнем случае необходима информация о законах распределения a_k и b_k . Учет перерывов в работе элементов может существенно повлиять на надежность системы, образованной этими элементами.

3.5. Преобразование Лапласа

Многие числовые показатели надежности элементов и систем выражаются через функции типа свертки или бесконечными рядами, члены которых являются свертками функций. Для исследования таких показателей большую помощь может оказать преобразование Лапласа. Оно удобно также при расчетах предельных значений функций, лежит в основе операционного метода решения дифференциальных уравнений и систем. Преобразование Лапласа позволяет преобразовать любую систему обыкновенных дифференциальных уравнений в систему линейных алгебраических уравнений. Пусть функция $f(t)$ кусочно-непрерывна при $t \geq 0$ и имеет ограниченный рост, т. е.

$$|f(t)| \leq C e^{at}, \quad (3.4)$$

где C и a — некоторые постоянные.

Тогда функция $f(t)$ называется оригиналом, а функция $\hat{f}(z) = \int_0^{+\infty} f(t)e^{-zt} dt$ — ее изображением. Переход от оригинала к изображению называется *преобразованием Лапласа*, а переход от изображения к соответствующему оригиналу — *обратным преобразованием Лапласа*. В дальнейшем вместо $\hat{f}(z)$ будем иногда писать $f(s)$.

Перечислим некоторые полезные свойства преобразования Лапласа.

1. Изображение линейной комбинации функций равно линейной комбинации изображений, т.е. если $f(t) = \sum_{i=1}^n c_i f_i(t)$, то $\hat{f}(z) = \sum_{i=1}^n c_i \hat{f}_i(z)$.

2. Изображением производной $f(t)$ является функция $z\hat{f}(z) - f(0)$.

3. Изображение свертки функций равно произведению изображений сомножителей, если $h(t) = f * g(t)$, то $\hat{h}(z) = \hat{f}(z)\hat{g}(z)$.

4. При вычислении предельных значений функций можно использовать равенство

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{z \rightarrow 0} z\hat{f}(z).$$

Заметим, что данное свойство не всегда верно. Так, например, если $f(t)$ представляет собой сумму δ -функций (обобщенных функций Дирака), т.е.

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta_{kT}(t),$$

то предел вообще не существует. Однако

$$\lim_{z \rightarrow 0} z\hat{f}(z) = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{z}{1 - e^{-Tz}} = \frac{1}{T}.$$

5. Если $f(t)$ — плотность распределения вероятностей неотрицательной случайной величины X , то ее изображение $\hat{f}(z)$ удовлетворяет соотношениям

$$\hat{f}^{(k)}(0) = \int_0^{+\infty} (-t)^k f(t) dt.$$

В частности, $\hat{f}(0) = 1$, $\hat{f}'(0) = -T$, $\hat{f}''(0) = \alpha_2$, где T — математическое ожидание, а α_2 — второй начальный момент случайной величины X .

Решение системы алгебраических уравнений, полученной по системе линейных дифференциальных уравнений, образуют дробно-рациональные функции вида

$$\hat{f}(z) = \frac{M(z)}{N(z)} = \frac{z^m + a_1 z^{m-1} + \dots + a_m}{z^n + b_1 z^{n-1} + \dots + b_n},$$

причем $m < n$. Если знаменатель дроби $N(z)$ имеет только простые корни z_1, z_2, \dots, z_n , то оригинал определяется равенством

$$\hat{f}(z) = \sum_{i=1}^n \frac{M(z_i)}{N'(z_i)} e^{z_i t}.$$

Если знаменатель дроби $N(z)$ имеет кратные корни: z_1 кратности r_1 , z_2 кратности r_2, \dots, z_k кратности r_k ($r_1 + r_2 + \dots + r_k = n$), то оригинал определяется равенством

$$f(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_i} A_{ij} \frac{t^{r_i-j}}{(r_i-j)!} e^{z_i t},$$

где коэффициенты A_{ij} находятся по формулам:

$$A_{ij} = \frac{1}{(j-1)!} \lim_{z \rightarrow z_i} \frac{d^{j-1}}{dz^{j-1}} ((z - z_i)^{r_i} f(z)), i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, r_i.$$

В формулы показателей надежности входит плотность распределения случайных временных значений, связанных с использованием изделия по назначению. Для автомобильных механизмов установлено, что временные случайные величины (наработки, ресурсы, длительности восстановлений) подчиняются чаще всего четырем статистическим законам, представленным в табл. 3.1, из которой видно, что каждый закон отличается видом плотности распределения и параметрами, входящими в ее выражение. При этом каждый из них применяется для описания не всех, а только определенных групп показателей надежности. При этом математическое выражение для каждого показателя будет различным (табл. 3.2).

На рис. 3.8 показана плотность различных законов распределения. Для всех законов распределения случайной величины, кроме экспоненциального (рис. 3.8, а) интенсивность отказов не является постоянной. Для установившегося периода работы автомобиль-

Типичные законы распределения наработок до отказов механизмов машин

Закон распределения	Плотность распределения	Определяемые показатели
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$ (λ — параметр распределения)	Наработка до отказа восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, состоящих из большого числа элементов. Нарботка до отказа детали (узла), обусловленного внезапными повреждениями и поломками после периода приработки
Вейбулла	$ab t^{b-1} e^{-at^b}$ (a, b — параметры распределения)	Наработка до отказа восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий при усталостном разрушении. Время восстановления изделий после отказа. Нарботка изделий в период приработки. Ресурс подшипников качения
Усеченный нормальный	$\frac{1}{\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}$ (σ, a — параметры распределения)	Наработка изделий с постепенным изменением характеристик (коррозия, трение, усталость). Ресурс восстанавливаемых изделий до первого капитального ремонта
Логарифмически-нормальный	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} e^{-\frac{(\ln t - a)^2}{2\sigma^2}}$ (a, σ — параметры распределения)	Наработка узлов (деталей) до отказа по причине усталостных износов. Периоды простоев по отысканию отказов

ных механизмов характерно распределение наработок до отказов по экспоненциальному закону, присущему внезапным отказам.

Необходимо отметить, что при расчетах надежности изделий автомобилестроения экспоненциальное распределение используют гораздо чаще, чем оно фактически имеет место. Это связано с его сравнительной математической простотой, а также с тем, что в большинстве случаев неизбежная при этом неточность расчета всегда идет в запас распределений.

**Основные соотношения для показателей безотказности
невосстанавливаемых изделий при различных законах распределения
наработки до отказа**

Показатель	Законы распределения			
	Экспонен- циаль- ный	Вейбулла	Усеченный нормальный	Логарифмически- нормальный
Плотность распреде- ления $f(t)$	$\lambda e^{-\lambda t}$	$ab t^{b-1} e^{-at^b}$	$\frac{1}{\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - a}{\sigma}\right)^2}$
Вероят- ность без- отказной работы $P(t)$	$e^{-\lambda t}$	e^{-at^b}	$\frac{\Phi\left(\frac{a-t}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right)}$	$\Phi\left(\frac{a - \ln t}{\sigma}\right)$
Интенсив- ность от- казов $\lambda(t)$	λ	$ab t^{b-1}$	$\frac{e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma \sqrt{2\pi} \Phi\left(\frac{a-t}{\sigma}\right)}$	$\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \frac{e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - a}{\sigma}\right)^2}}{\Phi\left(\frac{a - \ln t}{\sigma}\right)}$
Средняя наработка до перво- го отказа T_1	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{\Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right)}{a^{\frac{1}{b}}}$	$a + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi} \Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right)} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}}$	$e^{a + \frac{b^2}{2}}$

Экспоненциальное распределение целесообразно использовать при сравнительной оценке надежности нескольких вариантов схем проектируемых механизмов и устройств, а также при предварительной расчетной оценке их безотказности.

Вид распределения постепенных отказов зависит от процесса накопления повреждений, важное место среди которых занимает старение механизмов. Действительно, со временем материалы претерпевают изменения, вызванные коррозией, износом, накоплением деформаций, усталости и др. Примером может служить изменение зазора в трущейся паре вал—подшипник, часто встречающейся в механизмах. По мере вращения вала в сопряжении идут сложные процессы окисления поверхностных слоев, упрочнения и накопления в них усталости, абразивного резания и схватывания за счет адгезии. Наложение этих процессов приводит к постепенному увеличению зазора и потере работоспособности подшипника при достижении предельной величины износа.

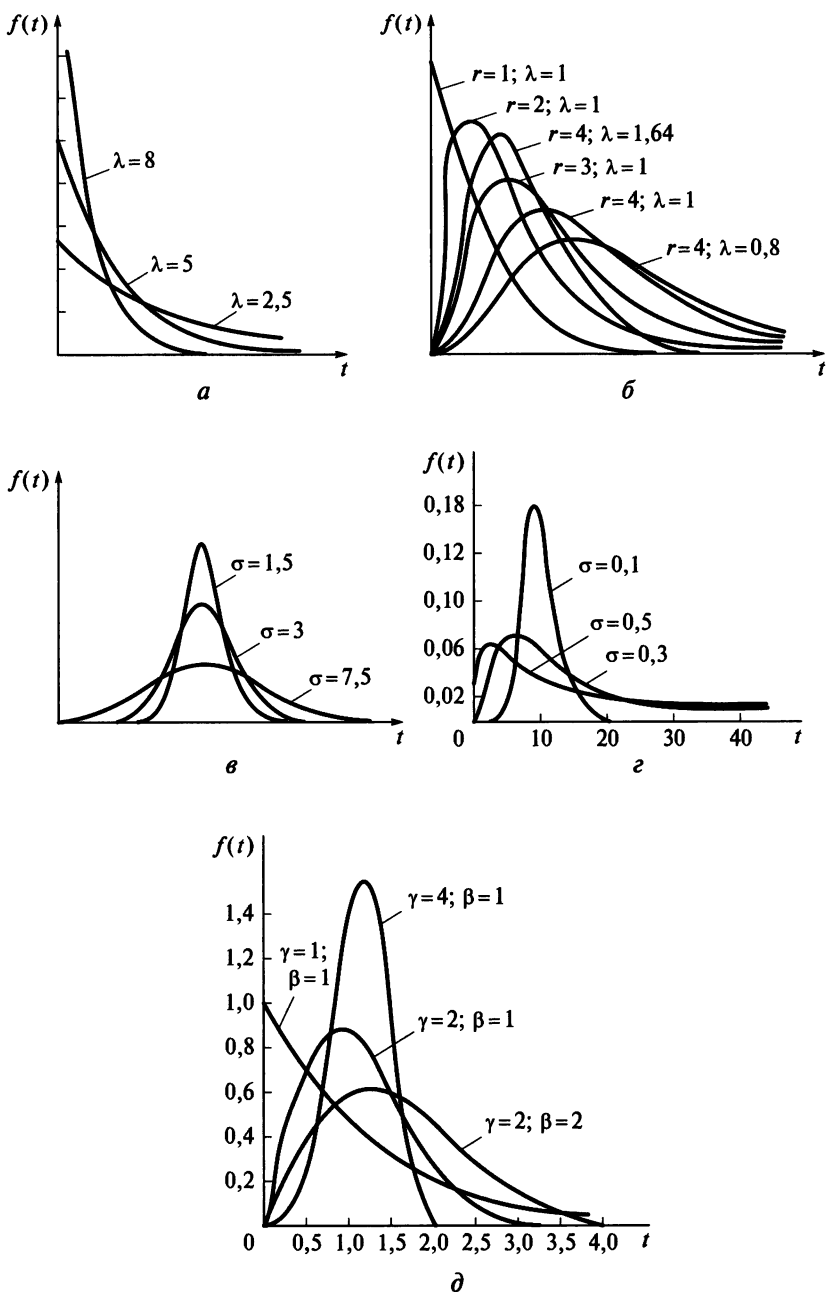
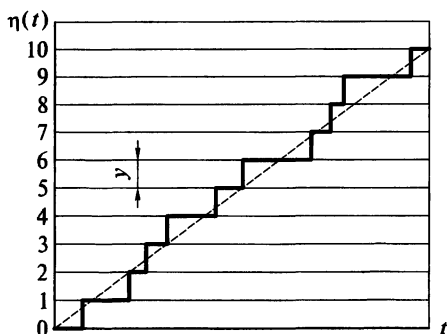


Рис. 3.8. Плотность различных законов распределения:

а — экспоненциального; *б* — гамма-распределения; *в* — нормального; *г* — логарифмически-нормального; *д* — Вейбулла

Рис. 3.9. Реализация процесса накопления повреждений:

$\eta(t)$ — функция накопления повреждений; y — некоторая постоянная величина износа; t — наработка



Пусть в случайные моменты времени возникают единичные повреждения равной величины, и при накоплении повреждений механизм выходит из строя (возникает постепенный отказ). Повреждение состоит в том, что износ в течение наработки t скачкообразно увеличивается на некоторую постоянную величину y . Такая картина износа отвечает модели накопления повреждений. Реализация процесса накопления повреждений представлена на рис. 3.9.

Такая модель старения механизмов пригодна в следующих случаях: массовое производство обеспечивает высокую однородность начального качества механизмов (высокую однородность исходных материалов, стабильный технологический процесс, жесткий контроль качества); нагрузки, действующие на механизм в процессе их эксплуатации, варьируются в довольно широких пределах; приработка частично обеспечивается в заводских условиях и в процессе эксплуатации занимает незначительное время [6].

Схеме накапливающихся повреждений отвечает гамма-распределение наработки до отказа. Плотность этого распределения (см. рис. 3.8, б) описывается выражением

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(r)} \lambda^r t^{r-1} e^{-\lambda t}, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0, \end{cases} \quad (3.5)$$

где $\Gamma(r) = \int_0^{\infty} x^{r-1} e^{-x} dx$ — гамма-функция; λ — средняя скорость износа; r — число повреждений, необходимых для возникновения отказа.

Отсюда следует, что число повреждений до отказа определяется соотношением $r = Gt/y$. С ростом числа r гамма-распределение становится более симметричным. В основе этого свойства лежит то

обстоятельство, что при возрастании r кривая $f(t)$ плотности гамма-распределения стремится к виду

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.6)$$

где a — математическое ожидание и σ — среднее квадратическое отклонение наработки до отказа — параметры распределения.

Формула (3.6) задает плотность нормального распределения. Кривые плотности нормального распределения (см. рис. 3.8, в) симметричны и имеют ветви, уходящие в сторону: $t = +\infty$ и $t = -\infty$. Таким образом, нормальное распределение задано на всей оси t от $-\infty$ до $+\infty$. Физически переход от гамма-распределения к нормальному обоснован, если реализации процесса износа длительное время «переплетаются», прежде чем начинают возникать отказы.

Тогда функцию нормального распределения можно представить в виде

$$\bar{\Phi}(t) = \int_{-\infty}^t f(u) du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{t-a}{\sigma}} e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (3.7)$$

Функция

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (3.8)$$

или ее разновидности широко табулирована в [2, 12, 29]. Очевидно, что

$$\bar{\Phi}(t) = \Phi\left(\frac{t-a}{\sigma}\right). \quad (3.9)$$

Нормальное распределение занимает особое место среди законов распределения, описывающих модели постепенных отказов. Основная его особенность заключается в том, что оно является предельным законом, к которому приближаются суммы большого числа независимых (или слабо зависимых) случайных величин, распределенных по любым законам и имеющих сравнительно близкие дисперсии (в соответствии с центральной предельной теоремой). Поэтому во многих случаях можно считать нормальным распределение исходных величин выходных параметров автомобильного транспорта, зависящих от большого числа случайных конструктивно-технологических факторов. Однако необходимо отметить существенный недостаток нормального распределения, заключающийся в том, что этот закон задан по всей оси от $-\infty$ до $+\infty$, тогда как изучаемая случайная величина — наработка до отказа (между отказами) — может изменяться от 0 до ∞ . Для не-

большого числа исследуемых элементов (например, двух—четырёх пар трения плунжер—гидроцилиндр (в тормозных и рулевых механизмах), которые имеют большое число r до разрушения, вероятность отрицательного значения t оказывается достаточно малой величиной и практически не влияет на точность расчетов надежности элемента машины. Но как только число стареющих однотипных элементов в механизме становится 15—20 и более вероятность отрицательного значения t становится существенной и значительно влияет на точность расчетов. В этом случае более корректно применить так называемый усеченный нормальный закон, имеющий следующее выражение для плотности распределения:

$$f(t) = \frac{1}{\Phi\left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}.$$

3.6. Доверительный интервал и доверительная вероятность

Оценка неизвестного параметра a одним числом \tilde{a} , как это было сказано ранее, называется «точечной». В ряде случаев требуется не только найти для параметра a подходящее численное значение, но и оценить его точность и надежность. Требуется знать, к каким ошибкам может привести замена параметра a его точечной оценкой \tilde{a} и с какой степенью уверенности можно ожидать, что эти ошибки не выйдут за известные пределы. Такого рода задачи особенно актуальны при малом числе наблюдений, когда точечная оценка a в значительной мере случайна и приближенная замена a на \tilde{a} может привести к серьезным ошибкам. Для оценки точности и надежности параметра a используют так называемый *доверительный интервал* и *доверительную вероятность*. Физический смысл доверительной вероятности рассмотрим на следующем примере.

Пусть для параметра a получена из опыта несмещенная оценка \tilde{a} . Мы хотим оценить возможную при этом ошибку.

Назначим некоторую достаточно большую вероятность β (например 0,95 или 0,99) такую, что событие с вероятностью β можно считать практически достоверным и найдем такое значение доверительного интервала ϵ , для которого справедливо выражение:

$$P(|\tilde{a} - a| \leq \epsilon) = \beta. \quad (3.10)$$

Тогда диапазон практически возможных значений ошибки, возникающей при замене a на \tilde{a} будет $\pm\epsilon$. Большие по абсолютной величине ошибки будут появляться только с малой вероятностью $\alpha = 1 - \beta$.

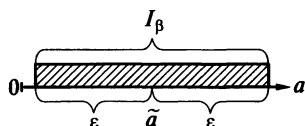


Рис. 3.10. К определению доверительного интервала параметра a

Перепишем выражение (3.10) в виде

$$P(|\tilde{a} - \epsilon p \epsilon p \tilde{a} + a|) = \beta.$$

Данное равенство означает, что с вероятностью β неизвестное значение параметра попадает в интервал

$$I_\beta = (\tilde{a} - \epsilon; \tilde{a} + \epsilon).$$

На рис. 3.10 показан доверительный интервал параметра a .

Положение доверительного интервала I_β на оси абсцисс случайно и определяется его центром \tilde{a} . Случайна вообще и длина интервала 2ϵ , так как величина ϵ вычисляется по опытным данным. Поэтому в данном случае лучше будет толковать величину β не как вероятность «попадания» точки a в интервал I_β , а как вероятность того, что случайный интервал I_β накроет точку a . Вероятность β принято называть доверительной вероятностью, а интервал I_β — доверительным интервалом.

Если известен закон распределения величины a (что, как правило, неизвестно), то задача нахождения доверительного интервала была бы весьма проста — достаточно было бы найти такое значение ϵ , для которого выполнялось бы условие (3.10).

Затруднение состоит в том, что закон распределения оценки \tilde{a} зависит от закона распределения величины X , а следовательно, от его неизвестных параметров (в частности, и от самого параметра a).

Для нормального закона распределения половину длины доверительного интервала определяют по формуле

$$\epsilon = t_\beta \sigma_m, \quad (3.11)$$

где t_β — критерий или квантиль распределения Стьюдента (квантилем, отвечающим заданному уровню вероятности β , называют такое значение $a = a_p$, при котором функция принимает значение, равное β , т.е. $P(a_p) = \beta$); σ_m — среднее квадратическое отклонение, определяемое опытным путем.

Величина t_β определяет для нормального закона число средних квадратических отклонений, которые нужно отложить вправо и влево от центра рассеяния для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок была равна β , т.е. доверительный интервал

$$I_\beta = (\tilde{a} + t_\beta \sigma_{\tilde{a}}; \tilde{a} - t_\beta \sigma_{\tilde{a}}).$$

Таблица 3.3

Значения критерия Стьюдента

β	t_β	β	t_β
0,80	1,282	0,91	1,694
0,81	1,310	0,92	1,750
0,82	1,340	0,93	1,810
0,83	1,371	0,94	1,880
0,84	1,404	0,95	1,960
0,85	1,439	0,96	2,053
0,86	1,475	0,97	2,169
0,87	1,513	0,98	2,352
0,88	1,554	0,99	2,576
0,89	1,597	0,9973	3,000
0,90	1,643	0,999	3,290

По табл. 3.3 находим значения доверительной вероятности β и критерия Стьюдента t_β .

Подставив найденное значение t_β в уравнение (3.11), найдем значение половины длины доверительного интервала ϵ .

Аналогичным способом может быть построен доверительный интервал и для дисперсии.

Контрольные вопросы

1. Какова основная цель сбора информации о надежности машин?
2. Решение каких задач должны обеспечить результаты сбора и обработки информации о надежности машин и оборудования?
3. Какова роль подконтрольной эксплуатации в системе сбора и учета информации о надежности?
4. Какие методы сбора информации в процессе эксплуатации машин вы можете назвать?
5. Что соответствует числовой характеристике случайной величины?
6. С помощью каких критериев производится проверка согласованности экспериментальной и выравнивающей кривых?
7. Какие законы распределения времени до отказа наиболее часто используются в теории надежности?
8. Каково назначение преобразования Лапласа в задачах построения теоретических законов распределения случайных величин?
9. В каких случаях оценки надежности целесообразно использовать экспоненциальное распределение?
10. Что называют доверительным интервалом и доверительной вероятностью?

Надежность сложных систем

4.1. Сложная система и ее характеристики

Большинство автомобилей являются сложными системами, состоящими из отдельных узлов, деталей, агрегатов, систем управления.

Сложная система — это объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы, каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

Понятие сложной системы условно. Оно может применяться к отдельным узлам и агрегатам, к машинам, к системам машин. Большей сложностью обладают, обычно, автоматизированные системы. Сложная система работает, как правило, в широком диапазоне условий эксплуатации и при различных режимах.

С позиций надежности сложная система обладает как отрицательными, так и положительными свойствами.

К факторам, отрицательно влияющим на надежность сложных систем, относят:

- большое число узлов, агрегатов, элементов, отказ каждого из которых может привести к отказу всей системы;
- уникальность — сложные системы часто являются уникальными или имеются в нескольких экземплярах, что не позволяет собрать достаточного количества статистических данных об их отказах для оценки их работоспособности;
- индивидуальность — даже у сложных систем и машин одинакового конструктивного оформления каждый экземпляр имеет индивидуальные черты. Незначительные вариации свойств отдельных элементов сказываются на выходных параметрах всей системы.

Для технических устройств можно высказать положение, что чем сложнее система, тем большими индивидуальными особенностями она обладает.

Вместе с тем сложные системы обладают и такими свойствами, которые положительно влияют на их надежность:

- сложным системам свойственна в той или иной мере самоорганизация, саморегулирование или самоприспособление, когда система способна найти наиболее устойчивое для своего функционирования состояние;

- для сложной системы, как правило, возможно восстановление работоспособности по частям, без прекращения ее функционирования. Например, в сложном технологическом комплексе возможно временное отключение отдельных участков для их технического обслуживания и ремонта;

- не все элементы одинаково влияют на надежность сложной системы, и можно выделить ограниченное число тех элементов, которые в основном определяют ее работоспособность.

Теоретически любую машину можно условно разделить на большое число элементов, понимая под элементом узел, агрегат, деталь, часть детали.

Элемент — это составная часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами.

Элемент обладает следующими особенностями:

- сам элемент может быть достаточно сложным и состоять из отдельных деталей и узлов;

- элемент не расчленяется на составные части при расчете надежности системы, поэтому показатели безотказности и долговечности относятся к элементу в целом;

- восстановление работоспособности элемента возможно независимо от других частей и элементов системы;

- выходные параметры элемента должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к надежности всей системы.

Выходные параметры каждого элемента могут по-разному влиять на надежность системы. Можно выделить три основных свойства выходных параметров (рис. 4.1):

X_1 — изменение параметра влияет на работоспособность лишь самого элемента. Отказ данного элемента влечет, как правило, и

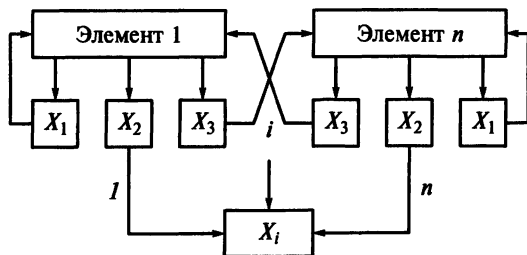


Рис. 4.1. Выходные параметры элементов сложной системы

отказ изделия (например, поломка двигателя ведет к отказу автомобиля);

X_2 — параметр участвует в формировании одного или нескольких выходных параметров всего изделия. Его изменения должны учитываться в совокупности с изменением параметров данной категории для других элементов. По отклонению только данного параметра нельзя судить об отказе элемента (например, износ тормозных колодок не приводит к полному отказу автомобиля);

X_3 — параметр влияет на работоспособность других элементов. Его изменение для некоторых элементов изделия аналогично изменению внешних условий работы (например, повышение температуры, вибраций, запыленности и т. п.).

Каждый параметр может обладать одним или несколькими из перечисленных свойств.

Для автомобилей более характерны системы, у которых выходные параметры отдельных элементов участвуют в формировании выходных параметров всего изделия (параметры типа X_2 на рис. 4.1).

Например, надежность работы рулевого механизма, предназначенного для точного перемещения ведомого звена, зависит от износостойкости всех звеньев, передающих движение.

С позиций надежности различают следующие структуры сложных систем:

- **расчлененные** — у которых надежность отдельных элементов может быть заранее определена, т. е. отказ элемента можно рассматривать как независимое событие;

- **связанные** — у которых отказ элементов является зависимым событием, связанным с изменением выходных параметров всей системы;

- **комбинированные** — состоящие из подсистем со связанной структурой и самостоятельным формированием показателей надежности для каждой из подсистем.

Для современных технических систем наиболее характерна комбинированная структура.

4.2. Надежность расчлененных систем

Для расчета надежности широко используют структурные схемы, в том случае, когда возможно расчленение сложной системы на отдельные независимые элементы. В этих схемах каждый i -й элемент характеризуется вероятностью его безотказной работы p_i в течение заданного периода времени и по этим значениям определяют вероятность безотказной работы $P(t)$ всей системы. Такие расчеты обычно называются *расчетом схемной надежности*.

Наиболее характерен случай, когда отказ одного элемента приводит из строя всю систему, как это имеет место, например, при

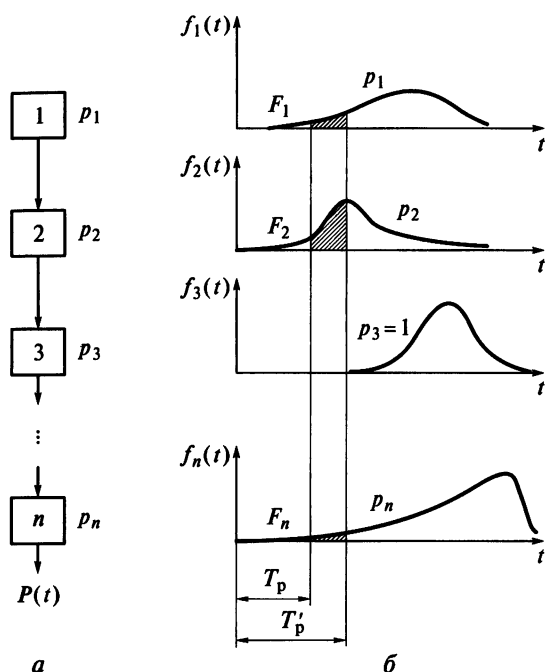


Рис. 4.2. Схема последовательного соединения элементов сложной системы: *а* — последовательное соединение элементов; *б* — вероятности безотказной работы элементов

последовательном соединении элементов (рис. 4.2, *а*). Так, если в приводе машины откажет любой из его элементов — электродвигатель, редуктор, муфты, механизмы управления, насос смазки, то весь привод перестанет функционировать. При этом отдельные элементы не обязательно должны быть соединены последовательно.

Вероятность безотказной работы такой системы равна произведению вероятностей безотказной работы элементов (по теореме умножения вероятностей независимых событий):

$$P(t) = p_1 p_2 \dots p_n = \prod_{i=1}^n p_i. \quad (4.1)$$

При одинаковой надежности элементов формула (4.1) примет вид

$$P(t) = p_i^n. \quad (4.2)$$

Сложные системы, состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью за счет наличия большого числа элементов.

Например, если узел состоит всего из 50 деталей, а вероятность безотказной работы каждой детали за выбранный промежуток времени составляет $p_i = 0,99$, то вероятность безотказной работы узла будет $P(t) = (0,99)^{50} = 0,55$. Если же узел с аналогичной безотказностью элементов состоит из 400 деталей, то $P(t) = (0,99)^{400} \approx 0,018$, т.е. узел становится практически неработоспособным.

Для расчета надежности системы должен быть известен закон распределения сроков службы (наработки) для каждого элемента.

При внезапных отказах часто применяют экспоненциальный закон, в котором параметром является интенсивность отказов $\lambda = \text{const}$, и вероятность безотказной работы элементов определяется как

$$P_1 = e^{-\lambda_1 t}; P_2 = e^{-\lambda_2 t}; \dots$$

Сделав подстановку в формулу (4.1), получим

$$P(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda_0 t}. \quad (4.3)$$

Таким образом, вероятность безотказной работы сложной системы в этом случае также подчиняется экспоненциальному закону с параметром

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (4.4)$$

Схема формирования значения вероятности безотказной работы для системы с последовательно соединенными элементами показана на рис. 4.2, б.

При изменении периода $t = T_p$ (ресурса), в течение которого рассматривается работа системы, изменяется и значение p_i для каждого элемента. Так, для изображенного на рис. 4.2, б случая при увеличении ресурса от T_p до T'_p вероятность отказа первого элемента возрастет в 2,5 раза, второй элемент станет практически неработоспособным ($p_2 = 0,5$), а третий элемент по-прежнему не будет лимитировать значение $P(t)$ для всей системы.

При анализе и расчете надежности элементов системы необходимо использование принципов системного подхода, когда данный механизм, двигатель, электронное устройство рассматриваются как составные части более сложной системы, когда оценивается влияние его надежности на все основные характеристики автомобиля и, в конечном итоге, на эффективность его функционирования.

Количественно надежность системы (автомобиля) зависит главным образом от трех факторов:

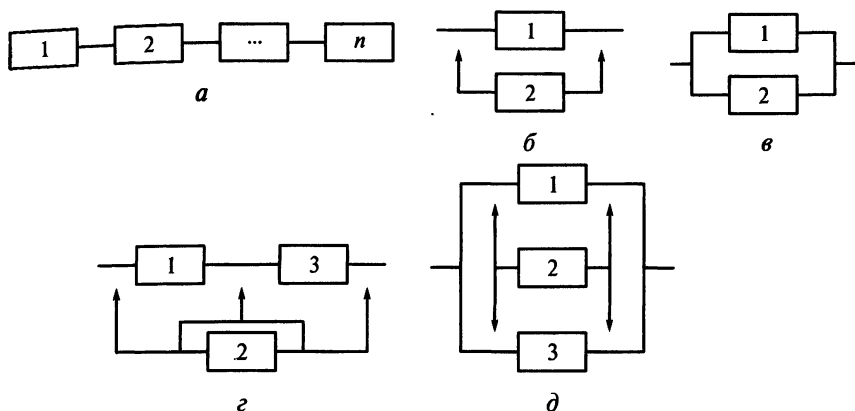


Рис. 4.3. Схемы соединения элементов в составе системы:

a — последовательное (основное) соединение элементов; *б* — резервирование замещением — ненагруженный резерв; *в* — параллельная работа элементов — нагруженный резерв; *г* — скользящий резерв с последовательной работой элементов 1 и 3; *д* — скользящий резерв с параллельной работой элементов 1 и 3

- надежности элементов, входящих в состав автомобиля;
- характера соединения элементов;
- временных характеристик (времени работы элементов на данном режиме).

Только совместное рассмотрение всех перечисленных факторов и их влияния на другие характеристики установки позволит определить требования к надежности отдельных элементов, а также наиболее рациональные мероприятия, направленные на ее повышение.

Для повышения надежности сложных систем применяют **метод резервирования**, т.е. создают дополнительные средства и возможности для сохранения работоспособности системы при отказе одного или нескольких ее элементов. При резервировании ненадежных элементов после отказа основного элемента дублер выполняет его работу, и узел продолжает функционировать. Резервирование может значительно повысить надежность системы.

Для расчета надежности на основании принципиальной схемы составляется функциональная (структурная) схема установки, отражающая характер связей элементов в ее составе с точки зрения надежности осуществления рабочего процесса. При составлении функциональных схем используют обозначения, представленные на рис. 4.3. Рассмотрим кратко каждую из указанных на этом рисунке схем.

1. **Последовательное** (основное) соединение элементов (рис. 4.3, *a*). Отказ любого из элементов 1, 2, ..., *n* приводит к отказу всей последовательной системы. Указанная система содержит минималь-

но необходимое для осуществления рабочего процесса число элементов. В случае отказа одного (любого) из элементов система не работает, отказавший элемент восстанавливается (ремонтируется или заменяется). В составе автомобиля во многих случаях последовательно соединены двигатель, коробка передач, карданный вал, редуктор, колеса. Последовательно соединены и многие вспомогательные механизмы. Рассматриваемая схема является наиболее распространенной, расчеты характеристик ее надежности делаются наиболее часто.

2. *Резервирование замещением* — ненагруженный резерв (рис. 4.3, б). В случае отказа основного элемента 1 включается резервный элемент 2. Отказавший элемент восстанавливается и ставится в резерв. Если работающий элемент откажет раньше, чем закончится восстановление отказавшего, наступает отказ системы и восстанавливаются оба элемента. По такой схеме резервируют вспомогательные механизмы: топливные, масляные и другие насосы.

3. *Параллельная работа элементов* — нагруженный резерв (рис. 4.3, в). Элементы 1 и 2 работают параллельно на один потребитель. В случае отказа любого из них второй продолжает работу, отказавший элемент восстанавливается и включается в работу. Если оставшийся исправным элемент откажет раньше, чем восстановится отказавший, наступает отказ системы и восстанавливаются оба элемента. Иногда на один потребитель работает более двух элементов. По такой схеме резервируют, например, электрогенераторы и элементы сложной системы охлаждения.

4. *Скользкий резерв* (рис. 4.3, г, д):

- элементы 1 и 3 (см. рис. 4.3, г) работают последовательно. При отказе любого из них вместо него включается резервный элемент 2. Отказавший элемент восстанавливается и ставится в резерв. Если один из работающих элементов откажет раньше, чем восстановится отказавший, наступает отказ системы и восстанавливаются оба отказавших элемента. Эта схема используется в конструкциях автомобильной техники реже, чем рассмотренные ранее схемы;

- элементы 1 и 3 (см. рис. 4.3, д) работают параллельно на один потребитель. При отказе любого из них включается резервный элемент 2. Отказавший элемент восстанавливается и ставится в резерв. Если один из работающих элементов откажет раньше, чем восстановится отказавший, восстанавливаются оба элемента. По такой схеме резервируют в ряде случаев элементы тормозных систем.

Указанные схемы соединения элементов в составе системы не являются единственно возможными, но на практике используются наиболее часто.

Зная функциональную схему установки и характеристики надежности входящих в ее состав элементов, можно оценить надеж-

ность различных схем соединения элементов, а затем и установки в целом.

Во время эксплуатации автомобиль работает в режимах, различающихся продолжительностью, номенклатурой включенных элементов и нагрузкой на них, что обуславливает различную надежность обеспечения режимов. Поэтому функциональные схемы целесообразно составлять для каждого режима. Однако часто достаточно выполнить расчет надежности для наиболее напряженного режима работы автомобиля.

Рассмотрим методы расчета характеристик надежности представленных на рис. 4.3 схем соединения элементов и начнем с определения *надежности последовательного соединения элементов*.

Допустим, имеются два последовательно соединенных элемента (см. рис. 4.3, а), например, двигатель и коробка передач. Присвоим этим элементам номера 1 и 2 соответственно.

Безотказная работа последовательной системы за время t есть событие, заключающееся в исправной работе за указанное время элементов 1 и 2. Тогда в предположении независимости отказов элементов (такое предположение, как правило, делается в теории надежности) вероятность безотказной работы системы можно записать в виде

$$P(t) = P_1(t)P_2(t), \quad (4.5)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$ — вероятности безотказной работы элементов 1 и 2 соответственно.

Зная $P(t)$ и используя приведенные ранее взаимосвязи между показателями надежности, будем иметь:

вероятность отказа

$$F(t) = 1 - P(t) = 1 - P_1(t)P_2(t); \quad (4.6)$$

плотность распределения наработки до отказа

$$f(t) = F(t) = f_1(t)P_2(t) + f_2(t)P_1(t); \quad (4.7)$$

интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \lambda_1(t) + \lambda_2(t); \quad (4.8)$$

средняя наработка до отказа

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} R_1(t)P_2(t)dt. \quad (4.9)$$

Зависимости (4.5) — (4.9) справедливы для любых законов распределения наработки до отказа элементов и, к тому же, легко могут быть обобщены на случай последовательной системы из n элементов. Подставляя в них, в частности, соответствующие вы-

ражения для экспоненциального закона (именно этот закон чаще других применяется в расчетах надежности элементов автомобиля), можно получить

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}; \\ F(t) &= 1 - e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}; \\ f(t) &= \sum_{i=1}^n \lambda_i e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}; \\ \lambda &= \sum_{i=1}^n \lambda_i; \\ T_{\text{ср}} &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Эти зависимости свидетельствуют о том, что если наработка до отказа каждого элемента распределена экспоненциально, то наработка до отказа последовательной системы также распределена экспоненциально.

Рассматривая зависимости (4.10), можно сделать вывод о том, что при достаточно большом числе элементов n надежность последовательной системы намного меньше надежности любого из ее элементов. Поэтому одним из эффективных средств повышения надежности последовательной системы является уменьшение числа n образующих ее элементов. Однако уменьшение часто связано с изменением других характеристик автомобиля. Так, исключение из состава автомобиля подогревателей охлаждающей жидкости уменьшает число отказов, однако при этом ухудшаются экономические показатели двигателя. При использовании трехступенчатой коробки передач для передачи крутящего момента на колеса автомобиля увеличивается надежность (при прочих равных условиях) по сравнению с другими типами коробок передач (четырёх-, пятиступенчатой и автоматической коробкой передач, где больше число элементов), однако ухудшаются скоростные и экономические характеристики автомобиля.

Таким образом, при исследовании и проектировании технических систем показатели надежности необходимо рассматривать во взаимосвязи с другими характеристиками для принятия оптимальных решений.

Найдем теперь комплексные показатели надежности, учитывая как безотказность, так и ремонтпригодность системы. Пусть, как и ранее, система состоит из двух последовательно соединенных элементов. Будем предполагать, что время работы до отказа и продолжительность восстановления элементов распределены по показательному закону с параметрами $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$ соответственно. В произвольный момент времени система может находиться в двух состояниях: работоспособном или неработоспособном. Обозначим вероятности нахождения в этих состояниях через $p(t)$ и $f(t)$. Система может оказаться в состоянии отказа вследствие отказа либо первого, либо второго элемента. Вероятности этих событий обозначим соответственно через $f_1(t), f_2(t)$. Поскольку при экспоненциальном распределении поток отказов является простейшим и, следовательно, ординарным, то здесь и далее можно пренебречь вероятностью одновременного отказа двух элементов. Тогда ясно, что $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$. Здесь и далее в этой главе вероятность нахождения восстанавливаемой системы или элемента в работоспособном состоянии (функция готовности) в момент t вероятности противоположного события обозначим строчными буквами p и f соответственно в отличие от прописных букв P и F , означающих вероятности безотказной работы и отказа в промежутке $(0, t)$.

Рассмотрим теперь момент времени $(t + \Delta t)$. Работоспособное состояние системы в этот момент есть событие, являющееся суммой трех несовместных событий:

- в момент t система работоспособна, и за время Δt ни один из элементов не отказал;
- в момент t система находилась в состоянии отказа вследствие неисправности элемента 1, но за время Δt этот элемент был восстановлен;
- в момент t система находилась в состоянии отказа вследствие неисправности элемента 2, но за время Δt этот элемент был восстановлен.

Учитывая, что с точностью до бесконечно малых высшего порядка по сравнению с Δt вероятности отказов элементов на промежутке Δt равны соответственно $\lambda_1 \Delta t, \lambda_2 \Delta t$, вероятности восстановления в течение Δt определяются произведениями $\mu_1 \Delta t, \mu_2 \Delta t$, а вероятности противоположных событий равны соответственно $1 - \lambda_1 \Delta t, 1 - \lambda_2 \Delta t, 1 - \mu_1 \Delta t$ и $1 - \mu_2 \Delta t$, функция готовности, т.е. вероятность $p(t + \Delta t)$ работоспособного состояния системы в момент $(t + \Delta t)$ можно записать в виде

$$p(t + \Delta t) = p(t)(1 - \lambda_1 \Delta t)(1 - \lambda_2 \Delta t) + f_1(t)\mu_1 \Delta t + f_2(t)\mu_2 \Delta t. \quad (4.11)$$

Перенеся $p(t)$ в левую часть, разделив обе части на Δt и перейдя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, будем иметь

$$p'(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2)p(t) + \mu_1 f_1(t) + \mu_2 f_2(t).$$

Событие, состоящее в том, что в момент $t + \Delta t$ система находится в состоянии отказа вследствие неисправности элемента 1, является суммой двух несовместных событий:

- система исправна в момент t , но за время Δt элемент 1 отказал;
- система находится в рассматриваемом состоянии в момент t , но за время Δt восстановление этого элемента не закончено.

Таким образом, вероятность $f_1(t)(t + \Delta t)$ можно представить в виде

$$f_1(t + \Delta t) = p(t)\lambda_1\Delta t(1 - \lambda_2\Delta t) + f_1(t)(1 - \mu_1\Delta t), \quad (4.12)$$

откуда

$$f_1'(t) = \lambda_1 p(t) - \mu_1 f_1(t).$$

Аналогично для производной $f_2'(t)$ получим выражение

$$f_2'(t) = \lambda_2 p(t) - \mu_2 f_2(t).$$

Учитывая, что $p(t) + f_1(t) + f_2(t) = 1$, для определения вероятностей $p(t)$, $f_1(t)$, $f_2(t)$ будем иметь следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= -(\lambda_1 + \lambda_2)p(t) + \mu_1 f_1(t) + \mu_2 f_2(t); \\ f_1'(t) &= \lambda_1 p(t) - \mu_1 f_1(t); \\ f_2'(t) &= \lambda_2 p(t) - \mu_2 f_2(t); \\ p(t) + f_1(t) + f_2(t) &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Разрешив эту систему, получим искомые вероятности как функции времени. Эти вероятности достаточно быстро (через 200... 500 ч) сходятся к своим предельным, не зависящим от времени значениям. При этом, естественно, производные в системе (4.13) становятся равными нулю. Поскольку надежность работы систем автомобиля и их отдельных элементов рассчитывается обычно для более продолжительного времени, наибольший интерес представляют именно эти предельные величины. Обозначим их, соответственно, через p , f_1 и f_2 . Поскольку эти вероятности от времени не зависят, то, преобразовав систему (4.13), получим

$$\left. \begin{aligned} -(\lambda_1 + \lambda_2)p + \mu_1 f_1 + \mu_2 f_2 &= 0; \\ \lambda_1 p - \mu_1 f_1 &= 0; \\ \lambda_2 p - \mu_2 f_2 &= 0; \\ p + f_1 + f_2 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

Решая систему относительно искомых вероятностей, найдем

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1}; \\ f_1 &= \frac{\lambda_1 \mu_2}{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1}; \\ f_2 &= \frac{\lambda_2 \mu_1}{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1}. \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Теперь можно записать и вероятность того, что система находится в неисправном состоянии:

$$f = f_1 + f_2 = \frac{\lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1}{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1}. \quad (4.16)$$

Числитель и знаменатель первого равенства из системы (4.15) и выражения (4.16) разделим на μ_1 , μ_2 . Введя обозначения $\gamma_1 = \lambda_1/\mu_1$ и $\gamma_2 = \lambda_2/\mu_2$ выражения для p и f можно записать в виде

$$p = \frac{1}{1 + \gamma_1 + \gamma_2}; \quad f = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{1 + \gamma_1 + \gamma_2}.$$

Обобщая этот результат на систему, имеющую в своем составе n последовательно соединенных элементов, найдем

$$p = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \gamma_i}; \quad f = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{1 + \sum_{i=1}^n \gamma_i}. \quad (4.17)$$

Очевидно, что вероятность p представляет собой стационарное значение коэффициента готовности системы.

Найдем теперь интенсивность восстановления и, следовательно, среднее время восстановления последовательной системы. Для этого воспользуемся тем, что, как было указано, безотказность системы эквивалентна безотказности одного элемента с интен-

сивностью отказов $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$. Тогда выражение для предельного значения коэффициента готовности этого элемента можно записать следующим образом:

$$\frac{\mu}{\sum_{i=1}^n \lambda_i + \mu}, \quad (4.18)$$

где μ — искомая интенсивность восстановления последовательной системы.

Как и ранее, рассмотрение начнем со случая двух последовательно соединенных элементов. Если приравнять первое из равенств системы (4.15) и выражение (4.18)

$$\frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1} = \frac{\mu}{\lambda_1 + \lambda_2 + \mu},$$

получим

$$\mu = \frac{\mu_1 \mu_2 (\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\gamma_1 + \gamma_2}.$$

Обобщение на случай n последовательно соединенных элементов имеет вид

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}. \quad (4.19)$$

Зная интенсивность восстановления последовательной системы, можно найти и среднее время восстановления

$$T_{\text{в}} = \frac{1}{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (4.20)$$

Пример 4.1. Рассмотрим три элемента технической системы (автомобиля): двигатель, коробку передач и карданный вал. Заданы следующие значения интенсивности отказов λ и восстановлений μ этих элементов:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч}; \quad \mu_1 = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ 1/ч}; \quad \lambda_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}; \\ \mu_2 &= 4,5 \cdot 10^{-1} \text{ 1/ч}; \quad \lambda_3 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}; \quad \mu_3 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ч}. \end{aligned}$$

Определить показатели надежности системы.

Решение. В соответствии с формулой (4.8) найдем интенсивность отказов системы:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 3,11 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч}.$$

Интенсивность восстановления определим с помощью формулы (4.19):

$$\mu = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} = 1,72 \cdot 10^{-1} \text{ 1/ч}.$$

Теперь, используя приведенные ранее зависимости, можно установить и другие показатели надежности, например:

вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-3,11 \cdot 10^{-4} t};$$

вероятность отказа

$$F(t) = 1 - e^{-3,11 \cdot 10^{-4} t};$$

средняя наработка до отказа

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} = 3\,215 \text{ ч};$$

коэффициент готовности

$$K_r = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^3 \gamma_i} = 0,9997.$$

Рассмотрим *надежность схемы с ненагруженным резервом* для частного случая резервирования — дублирования. Пример компоновки такой схемы показан на рис. 4.3, б.

В произвольный момент времени t система может находиться в одном из трех состояний:

- исправном (один из элементов работает, другой — в холодном резерве);
- один из элементов находится в состоянии отказа, другой исправен (исправный элемент работает, отказавший — восстанавливается);
- оба элемента находятся в состоянии отказа и, следовательно, восстанавливаются.

Определим вначале методы расчета характеристик безотказности, т. е. рассмотрим случай, когда восстановление элементов не учитывается. Вероятности перечисленных состояний обозначим через $P(t)$, $F_1(t)$ и $F_2(t)$ соответственно.

Вероятность нахождения системы в момент t в интервале $(0, t)$ в исправном состоянии есть вероятность безотказной работы элемента 1 за время t , т. е. $P(t) = P_1(t)$.

Вероятность $F_1(t)$ есть вероятность отказа элемента 1 в момент τ , ($\tau < t$) и исправной работы элемента 2 в интервале (τ, t) . Таким образом:

$$F_1(t) = \int_0^t f_1(\tau) P_2(t - \tau) d\tau.$$

Вероятность $F_2(t)$ есть вероятность отказа элемента 1 в момент τ ($\tau < t$) и отказа элемента 2 в момент θ ($\tau < \theta < t$), следовательно,

$$F_2(t) = \int_0^t \int_0^t f_1(\tau) f_2(\theta - \tau) d\theta d\tau.$$

Подставляя в эти зависимости вместо $f(t)$ и $P(t)$ их значения для показательного распределения времени работы до отказа, найдем

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda_1 t}; \\ F_1(t) &= \frac{\lambda_1 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}; \\ F_2(t) &= 1 - \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1}. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

Если основной и резервный элементы имеют одинаковую надежность, т. е. если $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$, то, раскрывая неопределенность в системе (4.21), окончательно получаем

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda t}; \\ F_1(t) &= \lambda t e^{-\lambda t}; \\ F_2(t) &= 1 - (1 + \lambda t) e^{-\lambda t}. \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

Зная указанные величины, нетрудно найти и другие характеристики надежности. Отметим только, что средняя наработка системы до отказа (время до отказа обоих элементов системы) равна сумме средних наработок до отказа элементов, т. е.

$$T_{cp} = T_{cp1} + T_{cp2} = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2.$$

Рассмотрим теперь влияние восстановления для случая $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$ и $\mu_1 = \mu_2 = \mu$. Обозначим вероятности нахождения системы в произвольный момент времени t в указанных ранее состояниях с учетом восстановления элементов после отказа через $p(t)$, $f_1(t)$ и $f_2(t)$. Уравнения для определения этих вероятностей, составленные для равнонадежных элементов 1 и 2, как и в случае последовательного соединения, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= -\lambda p(t) + \mu f_1(t); \\ f_1'(t) &= \lambda p(t) - (\lambda + \mu) f_1(t) + 2\mu f_2(t); \\ f_2'(t) &= \lambda f_1(t) - 2\mu f_2(t); \\ p(t) + f_1(t) + f_2(t) &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

Систему алгебраических уравнений для определения предельных значений искомых вероятностей получим в виде

$$\left. \begin{aligned} -\lambda p + \mu f_1 &= 0; \\ \lambda p - (\lambda + \mu) f_1 + 2\mu f_2 &= 0; \\ \lambda q_1 - 2\mu f_2 &= 0; \\ p + f_1 + f_2 &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему, найдем

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{2\mu^2}{\lambda^2 + 2\lambda\mu + 2\mu^2}; \\ f_1 &= \frac{2\lambda\mu}{\lambda^2 + 2\lambda\mu + 2\mu^2}; \\ f_2 &= \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 2\lambda\mu + 2\mu^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Ранее указаны расчетные зависимости для показателей надежности системы с ненагруженным резервом. Данные (или аналогичные им) показатели рассчитывались ранее для нерезервированного элемента и для последовательной системы. Однако наличие резервного элемента не только количественно изменяет характеристики надежности, но и оказывает качественное влияние. Так, для резервированных систем особое значение приобретают показатели надежности, которые не могут быть рассчитаны в схемах без резерва. К их числу относится вероятность безотказной работы системы с учетом восстановления элементов. Обозначим ее через $\bar{P}(t)$. Отказ обоих элементов означает отказ дублированной системы. При отказе одного элемента второй продолжает работу, отказавший элемент восстанавливается. Однако возможен случай, когда работающий элемент откажет раньше, чем восстановится отказавший. Это приведет к отказу системы. Величина $\bar{P}(t)$ представляет собой вероятность события, состоящего в том, что за время t указанной ситуации не произойдет. Для нахождения этой вероятности будем считать состояние отказа обоих элементов поглощающим состоянием системы. Тогда искомая вероятность $\bar{P}(t) = 1 - \bar{f}(t)$, где вероятность отказа системы, обозначенная как $\bar{f}(t)$, с учетом восстановления элементов определится из уравнений, описывающих работу дублированной системы с учетом поглощающего состояния. Эти уравнения могут быть получены из системы (4.23), если исключить из нее члены; определяющие вы-

ход из поглощающего состояния, т. е. члены, содержащие множитель 2μ . Таким образом, будем иметь

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= -\lambda p(t) + \mu f_1(t); \\ f_1'(t) &= \lambda p(t) - (\lambda + \mu) f_1(t); \\ \bar{f}'(t) &= \lambda f_1(t). \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему, найдем вероятность $\bar{f}'(t)$ и, следовательно, $\bar{P}(t)$. Теперь можно определить и среднюю наработку системы до отказа с учетом восстановления элементов $\bar{T}_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} \bar{P}(t) dt$.

Выполнив все указанные вычисления, окончательно получим

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{2\lambda + \mu}{\lambda^2} = \frac{2}{\lambda} + \frac{\mu}{\lambda^2} = 2T_{\text{ср}} + \frac{T_{\text{ср}}^2}{T_{\text{в}}}. \quad (4.25)$$

Выражение (4.25) показывает, что величина $\bar{T}_{\text{ср}}$ состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое $2T_{\text{ср}}$ определяет влияние резервирования без учета восстановления, второе слагаемое $T_{\text{ср}}^2/T_{\text{в}}$ характеризует именно влияние восстановления. Представляет интерес сравнение значений этих двух членов.

Пусть, например, среднее время работы до отказа элементов $T_{\text{ср}} = 5\,000$ ч, а средняя продолжительность восстановления $T_{\text{в}} = 50$ ч. Тогда среднее время работы до отказа с учетом восстановления

$$\bar{T}_{\text{ср}} = 2T_{\text{ср}} + \frac{T_{\text{ср}}^2}{T_{\text{в}}} = 10\,000 + 500\,000 = 510\,000 \text{ ч},$$

т. е. эффект восстановления вносит определяющий вклад в значение величины $\bar{T}_{\text{ср}}$. Отсюда очевидна особая актуальность обеспечения ремонтпригодности элементов, входящих в состав резервированных систем. Именно возможность восстановления отказавшего элемента резко увеличивает эффект резервирования.

Пример 4.2. Циркуляционный насос смазочной системы двигателя резервируется по схеме замещения. Интенсивности отказов и восстановлений каждого насоса соответственно $\lambda = 2 \cdot 10^{-4}$ 1/ч, $\mu = 2 \cdot 10^{-1}$ 1/ч.

Определить характеристики надежности резервированной системы.

Решение. В соответствии с зависимостями (4.22) и (4.24):

вероятность безотказной работы основного элемента

$$P(t) = e^{-2 \cdot 10^{-4} t};$$

вероятность отказа одного элемента

$$F_1(t) = 2 \cdot 10^{-4} t e^{-2 \cdot 10^{-4} t};$$

вероятность отказа обоих элементов

$$F_2(t) = 1 - (1 + 2 \cdot 10^{-4} t) e^{-2 \cdot 10^{-4} t};$$

средняя наработка до отказа

$$T_{\text{ср}} = \frac{2}{\lambda} = 10\,000 \text{ ч};$$

стационарное значение вероятности того, что в произвольный момент времени t будут исправны оба элемента системы:

$$p = \frac{8 \cdot 10^{-2}}{8 \cdot 10^{-2} + 4 \cdot 10^{-8} + 8 \cdot 10^{-5}} = 0,999;$$

стационарное значение вероятности того, что в произвольный момент времени t один из элементов системы будет в состоянии отказа:

$$f_1 = \frac{8 \cdot 10^{-5}}{8 \cdot 10^{-2} + 4 \cdot 10^{-5} + 8 \cdot 10^{-5}} = 0,001;$$

стационарное значение вероятности того, что в произвольный момент времени откажут оба элемента:

$$f_1 \approx 0;$$

средняя наработка системы до отказа с учетом восстановления

$$\bar{T}_{\text{ср}} = 10\,000 + 5 \cdot 10^6 = 5,01 \cdot 10^6 \text{ ч.}$$

Рассмотрим *надежность параллельной работы элементов*, показанных на рис. 4.3, в.

Такая схема часто встречается на практике, когда равнонадежные элементы 1 и 2 работают на один потребитель с некоторой нагрузкой N .

При отказе одного из них другой продолжает работу с нагрузкой N' (интенсивность отказов λ'), отказавший элемент восстанавливается с интенсивностью μ . Если в состоянии отказа находятся оба элемента, они восстанавливаются с интенсивностью 2μ .

В произвольный момент времени система может находиться в одном из трех состояний:

- исправном (работают оба элемента);
- один из элементов отказал и восстанавливается, другой продолжает работу;
- оба элемента находятся в состоянии отказа и восстанавливаются (отказ системы).

Как и ранее, вначале рассмотрим показатели безотказности. Вероятности указанных состояний обозначим соответственно через $P(t)$, $F_1(t)$ и $F_2(t)$.

Вероятность нахождения системы в первом из перечисленных состояний есть вероятность события, являющегося произведением двух событий, заключающихся в исправной работе элементов 1 и 2 за время t , т.е. $P(t) = P_1(t)P_2(t)$.

Вероятность $F_1(t)$ есть вероятность события, состоящего в отказе одного из элементов в момент τ ($\tau < t$) и исправной работе другого элемента в промежутке $(0, t)$:

$$F_1(t) = 2 \int_0^t f(\tau) P(\tau) P'(t - \tau) d\tau,$$

где $P'(t - \tau)$ — вероятность безотказной работы элемента, работающего в течение времени $(t - \tau)$ с нагрузкой N' .

Вероятность $F_2(t)$ определяется как вероятность события, заключающегося в отказе одного из элементов в момент $\tau < t$ и другого — в момент θ ($\tau < \theta < t$)

$$F_2(t) = \int_0^t \int_{\tau}^t f(\tau) P(\tau) f'(\theta - \tau) d\theta d\tau.$$

Для показательного распределения времени работы до отказа элементов будем иметь

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-2\lambda t}; \\ F_1(t) &= \frac{2\lambda(-2\lambda t - e^{-\lambda' t})}{\lambda' - 2\lambda}; \\ F_2(t) &= 1 - \frac{\lambda' e^{-2\lambda t} - 2\lambda e^{-\lambda' t}}{\lambda' - 2\lambda}. \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

Если изменения нагрузки после отказа одного из элементов не происходит, т.е. если $\lambda' = \lambda$, то, раскрывая неопределенность в системе (4.26), получаем

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-2\lambda t}; \\ F_1(t) &= 2e^{-\lambda t} - 2e^{-2\lambda t}; \\ F_2(t) &= 1 - 2e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t}. \end{aligned} \right\}$$

Зная эти вероятности, можно найти и другие показатели безотказности. Отметим только, что средняя наработка системы до

отказа обоих элементов, полученная интегрированием вероятности $1 - F_2(t)$, равна $T_{\text{ср}} = 1/(2\lambda) + 1/\lambda'$.

Если перераспределения нагрузки не происходит, то $T_{\text{ср}} = 3/(2\lambda)$.

Рассмотрим теперь показатели надежности системы с учетом восстановления элементов. Обозначим вероятности нахождения системы в указанных ранее состояниях в произвольный момент времени (соответственно через $p(t)$, $f_1(t)$ и $f_2(t)$).

Уравнения, описывающие работу системы, т.е. уравнения для определения этих вероятностей, будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= -2\lambda p(t) + \mu f_1(t); \\ f_1'(t) &= 2\lambda p(t) - (\lambda' + \mu) f_1(t) + 2\mu f_2(t); \\ f_2'(t) &= \lambda' f_1(t) - 2\mu f_2(t); \\ p(t) + f_1(t) + f_2(t) &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Алгебраическую систему уравнений для определения финальных значений искомых вероятностей запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} -2\lambda p + \mu f_1 &= 0; \\ 2\lambda p - (\lambda' + \mu) f_1 + 2\mu f_2 &= 0; \\ \lambda' f_1 - 2\mu f_2 &= 0; \\ p + f_1 + f_2 &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему, найдем

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{\mu^2}{\lambda\lambda' + 2\lambda\mu + \mu^2}; \\ f_1 &= \frac{2\lambda\mu}{\lambda\lambda' + 2\lambda\mu + \mu^2}; \\ f_2 &= \frac{\lambda\lambda'}{\lambda\lambda' + 2\lambda\mu + \mu^2}. \end{aligned} \right\}$$

Найдем теперь среднюю наработку системы до отказа с учетом восстановления элементов. Уравнения, описывающие работу системы при наличии поглощающего состояния, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= -2\lambda p(t) + \mu f_1(t); \\ f_1'(t) &= 2\lambda p(t) - (\lambda' + \mu) f_1(t); \\ \overline{f_2}'(t) &= \lambda' f_1(t). \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему, найдем $\bar{p}(t) = 1 - f_2(t)$ и, наконец, среднюю наработку до отказа системы с учетом восстановления элементов.

Пример 4.3. Элементы смазочной системы двигателя работают параллельно. Интенсивность отказов элементов $\lambda = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч. Интенсивность восстановления $\mu = 2,5 \cdot 10^{-2}$ 1/ч.

Определить показатели надежности резервированной системы в предположении, что при отказе одного из маслоохладителей нагрузка другого не меняется.

Решение. Воспользуемся приведенными ранее зависимостями: вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-6 \cdot 10^{-5} t};$$

вероятность отказа одного из элементов

$$F_1(t) = 2e^{-3 \cdot 10^{-5} t} - 2e^{-6 \cdot 10^{-5} t};$$

вероятность отказа обоих элементов

$$F_2(t) = 1 - 2e^{-3 \cdot 10^{-5} t} + e^{-6 \cdot 10^{-5} t};$$

среднее время работы системы до отказа

$$T_{\text{ср}} = \frac{3}{2\lambda} = 500\,000 \text{ ч};$$

стационарное значение вероятности нахождения системы в момент t в исправном состоянии

$$p = \frac{6,25 \cdot 10^{-4}}{9 \cdot 10^{-10} + 15 \cdot 10^{-7} + 6,25 \cdot 10^{-4}} = 0,9976;$$

стационарное значение вероятности того, что отказал один элемент системы

$$f_1 = \frac{15 \cdot 10^{-7}}{9 \cdot 10^{-10} + 15 \cdot 10^{-7} + 6,25 \cdot 10^{-4}} = 0,0024;$$

стационарное значение вероятности того, что отказали два элемента (отказ системы)

$$f_2 = \frac{9 \cdot 10^{-10}}{9 \cdot 10^{-10} + 15 \cdot 10^{-7} + 6,25 \cdot 10^{-4}} \approx 0;$$

средняя наработка системы до отказа с учетом восстановления элементов

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{3\lambda + \mu}{2\lambda^2} = \frac{9 \cdot 10^{-5} + 2,5 \cdot 10^{-2}}{18 \cdot 10^{-10}} = 13,946 \text{ ч}.$$

Рассмотрим *надежность скользящего резерва*, схема которого представлена на рис. 4.3, з.

В произвольный момент времени система может находиться в одном из следующих состояний:

- исправном (работают два элемента, третий — в резерве);
- отказавший элемент восстанавливается, два оставшихся продолжают работу;
- два отказавших элемента восстанавливаются, третий исправен, но не работает (отказ системы).

Вероятности указанных состояний обозначим соответственно через $P(t)$, $F_1(t)$ и $F_2(t)$.

В промежутке $(0, t)$ работают элементы 1 и 3, т.е.

$$P(t) = P_1(t)P_3(t).$$

Вероятность $F_1(t)$ есть вероятность события, состоящего в отказе элемента 1 или 3 в момент τ ($\tau < t$) и исправной работе оставшегося элемента и резервного до момента t :

$$F_1(t) = \int_0^t f_1(\tau)P_2(t-\tau)P_3(t-\tau)d\tau + \int_0^t f_3(\tau)P_2(t-\tau)P_1(t-\tau)d\tau.$$

Вероятность $F_2(t)$ определим как

$$F_2(t) = 1 - P(t) - F_1(t).$$

Для показательного распределения времени работы до отказа и равнонадежных элементов будем иметь

$$\begin{aligned}P(t) &= e^{-2\lambda t}; \\F_1(t) &= 2\lambda t e^{-2\lambda t}; \\F_2(t) &= 1 - e^{-2\lambda t} (1 + 2\lambda t).\end{aligned}$$

С помощью этих вероятностей можно найти и другие показатели надежности. Приведем лишь формулу для средней наработки до отказа: $T_{ср} = 1/\lambda$. Таким образом, с точки зрения среднего времени работы до отказа рассматриваемая схема резервирования аналогична схеме с одним нерезервированным элементом.

Рассмотрим теперь показатели надежности с учетом восстановления элементов.

Обозначим вероятности нахождения системы в указанных ранее состояниях соответственно через $p(t)$, $f_1(t)$ и $f_2(t)$. Пусть элементы 1, 2 и 3 равнонадежны, т.е. $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$ и имеют одинаковую интенсивность восстановления μ . Тогда уравнения, описывающие работу системы, можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= -2\lambda p(t) + \mu f_1(t); \\ f_1'(t) &= 2\lambda p(t) - (2\lambda + \mu)f_1(t) + 2\mu f_2(t); \\ f_2'(t) &= 2\lambda f_1(t) - 2\mu f_2(t); \\ p(t) + f_1(t) + f_2(t) &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему, найдем искомые вероятности как функции времени. Однако, как и ранее, нас интересуют предельные, не зависящие от времени значения этих вероятностей. Их найдем из следующей системы алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -2\lambda p + \mu f_1 &= 0; \\ 2\lambda p - (2\lambda + \mu)f_1 + 2\mu f_2 &= 0; \\ 2\lambda f_1 - 2\mu f_2 &= 0; \\ p + f_1 + f_2 &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему, получаем

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{\mu^2}{2\lambda^2 + 2\lambda\mu + \mu^2}; \\ f_1 &= \frac{2\lambda\mu}{2\lambda^2 + 2\lambda\mu + \mu^2}; \\ f_2 &= \frac{2\lambda^2}{2\lambda^2 + 2\lambda\mu + \mu^2}. \end{aligned} \right\}$$

Аналогично изложенному ранее можно найти среднюю наработку до отказа системы с учетом восстановления элементов. Для этого следует составить уравнения, описывающие работу резервированной системы при наличии поглощающего состояния. Не будем приводить эту систему уравнений, поскольку ее можно легко получить из приведенных ранее зависимостей путем исключения из них членов, содержащих множитель 2μ . Выполняем операции, необходимые для подсчета $\bar{T}_{\text{ср}}$ (они аналогичны рассмотренным ранее):

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} + \frac{\mu}{4\lambda^2}.$$

Пример 4.4. Элементы системы охлаждения двигателя соединены по схеме скользящего резерва. Интенсивности отказов и восстановления элементов соответственно равны $\lambda = 1 \cdot 10^{-5}$ 1/ч; $\mu = 1 \cdot 10^{-2}$ 1/ч.

Определить показатели надежности резервированной системы.

Решение. Воспользовавшись полученными формулами, запишем: вероятность безотказной работы двух основных насосов

$$P(t) = e^{-2 \cdot 10^{-5} t};$$

вероятность отказа одного элемента за время t

$$F_1(t) = 2 \cdot 10^{-5} t e^{-2 \cdot 10^{-5} t};$$

вероятность отказа двух элементов

$$F_2(t) = 1 - e^{-2 \cdot 10^{-5} t} (1 + 2 \cdot 10^{-5} t);$$

стационарное значение вероятности нахождения системы в произвольный момент времени t в исправном состоянии

$$p = \frac{10^{-4}}{2 \cdot 10^{-10} + 2 \cdot 10^{-7} + 10^{-4}} = 0,998;$$

стационарное значение вероятности того, что отказал один из элементов

$$f_1 = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-10} + 2 \cdot 10^{-7} + 10^{-4}} = 0,002;$$

стационарное значение вероятности того, что отказали два элемента

$$f_2 = \frac{2 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 10^{-10} + 2 \cdot 10^{-7} + 10^{-4}} \approx 0;$$

среднее время работы системы до отказа с учетом восстановления

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} + \frac{\mu}{4\lambda^2} = 251 \cdot 10^5 \text{ ч.}$$

Рассмотрим схему, представленную ранее на рис. 4.3, д.

Пусть в произвольный момент времени t резервированная система может находиться в одном из следующих состояний:

- исправном (элементы 1 и 3 работают, элемент 2 в резерве);
- один из элементов отказал и восстанавливается, оставшийся исправным и резервный работают;
- два отказавших элемента восстанавливаются, оставшийся исправным элемент продолжает работу с некоторой нагрузкой N' , отличающейся от нагрузки при двух работающих элементах;
- три отказавших элемента восстанавливаются (отказ системы).

Найдем вначале показатели безотказности. Вероятности указанных ранее событий в промежутке $(0, t)$ обозначим соответственно через $P(t)$, $F_1(t)$, $F_2(t)$ и $F_3(t)$. Далее будем предполагать элементы 1, 2 и 3 равнонадежными. Исправная работа системы в

промежутке $(0, t)$ есть событие, состоящее в безотказной работе элементов 1 и 3, т.е.

$$P(t) = P_1(t)P_3(t).$$

Вероятность $F_1(t)$ есть вероятность события, состоящего в отказе элемента 1 или 3 в момент τ ($\tau < t$) и исправной работе оставшегося рабочего и резервного элементов до момента t :

$$F_1(t) = \int_0^t f(\tau)P(\tau)P(t-\tau)d\tau.$$

Вероятность $F_2(t)$ определится из условия отказа одного из элементов в момент τ , отказа второго рабочего или резервного элемента в момент θ ($\tau < \theta < t$) и исправной работе оставшегося элемента до момента t :

$$\begin{aligned} F_2(t) = & 2 \int_0^t \int_{\tau}^t f(\tau)P(\tau)f(\theta-\tau)P(\theta-\tau)P'(t-\theta)d\theta d\tau + \\ & + 2 \int_0^t \int_{\tau}^t f(\tau)P(\theta)f(\theta-\tau)P'(t-\theta)d\theta d\tau. \end{aligned}$$

Учитывая, что $P(\tau)P(\theta-\tau) = P(\theta)$, получаем

$$F_2(t) = 4 \int_0^t \int_{\tau}^t f(\tau)f(\theta-\tau)P(\theta)P'(t-\theta)d\theta d\tau.$$

Наконец, вероятность $F_3(t)$ равна

$$F_3(t) = 1 - P(t) - F_1(t) - F_2(t).$$

Для экспоненциального закона найдем

$$P(t) = e^{-2\lambda t};$$

$$F_1(t) = 2\lambda t e^{-2\lambda t};$$

$$F_2(t) = 4 \left(\frac{\lambda^2 t e^{-2\lambda t}}{\lambda' - 2\lambda} - \frac{\lambda^2 e^{-2\lambda t}}{(\lambda' - 2\lambda)^2} + \frac{\lambda^2 e^{-\lambda' t}}{(\lambda' - 2\lambda)^2} \right);$$

$$F_3(t) = 1 - e^{-2\lambda t} (1 + 2\lambda t) - 4 \left(\frac{\lambda^2 t e^{-2\lambda t}}{\lambda' - 2\lambda} - \frac{\lambda^2 e^{-2\lambda t}}{(\lambda' - 2\lambda)^2} + \frac{\lambda^2 e^{-\lambda' t}}{(\lambda' - 2\lambda)^2} \right),$$

где λ, λ' — интенсивность отказов элементов при нагрузке N и N' соответственно.

Если при отказе двух элементов нагрузка на оставшийся не меняется, т. е. если $N = N'$ и $\lambda = \lambda'$, то указанные ранее зависимости будут иметь вид

$$\begin{aligned}P(t) &= e^{-2\lambda t}; \\F_1(t) &= 2\lambda t e^{-2\lambda t}; \\F_2(t) &= 4e^{-\lambda t} - 4e^{-2\lambda t}(1 + \lambda t); \\F_3(t) &= 1 - 4e^{-\lambda t} + 3e^{-2\lambda t} + 2\lambda t e^{-2\lambda t}.\end{aligned}$$

Средняя наработка системы до отказа, полученная интегрированием вероятности $1 - F_3(t)$,

$$T = \frac{(\lambda')^3 - 3\lambda(\lambda')^2 + 4\lambda^3}{\lambda'\lambda(\lambda' - 2\lambda)^2},$$

откуда

при $\lambda' = \lambda$ $T = 2/\lambda$;

при $\lambda' = 2\lambda$ $T = 3/(2\lambda)$;

при $\lambda' \rightarrow \infty$ $T_{\text{ср}} \rightarrow 1/\lambda$.

Таким образом, если при отказе двух элементов режим работы третьего не меняется ($\lambda = \lambda'$), то относительно величины T рассматриваемая схема резервирования эквивалентна схеме резервирования замещением (случай равнонадежных элементов). Если режим работы меняется так, что при нагрузке интенсивность отказов удваивается, данная схема резервирования эквивалентна схеме постоянно включенного резерва (случай $\lambda = \lambda'$). Наконец, если при нагрузке N' интенсивность отказов весьма велика, то T равно среднему времени работы до отказа нерезервированного элемента. Эти выводы свидетельствуют о возможности сравнения различных схем резервирования элементов систем автомобиля и выбора оптимальной схемы с учетом данных о стоимости и массогабаритных характеристиках различных схем.

Рассмотрим теперь показатели надежности, учитывающие восстановление элементов после отказа. Для этого случая вероятности нахождения системы в произвольный момент времени t в одном из перечисленных ранее состояний обозначим через $p(t)$, $f_1(t)$, $f_2(t)$ и $f_3(t)$ соответственно.

Уравнения, описывающие работу резервированной системы с учетом восстановления, имеют вид

$$\begin{aligned}p'(t) &= -2\lambda p(t) + \mu f_1(t); \\f_1'(t) &= 2\lambda p(t) - (2\lambda + \mu)f_1(t) + 2\mu f_2(t); \\f_2'(t) &= 2\lambda f_1(t) - (\lambda' + 2\mu)f_2(t) + 3\mu f_3(t); \\f_3'(t) &= \lambda' f_2(t) - 3\mu f_3(t); \\p(t) + f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) &= 1.\end{aligned}$$

Для предельных значений искомых вероятностей имеем следующую систему алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -2\lambda p + \mu f_1 &= 0; \\ 2\lambda p - (2\lambda + \mu)f_1 + 2\mu f_2 &= 0; \\ 2\lambda f_1 - (\lambda' + 2\mu)f_2 + 3\mu f_3 &= 0; \\ \lambda' f_2 - 3\mu f_3 &= 0; \\ p + f_1 + f_2 + f_3 &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему, получаем

$$\begin{aligned} p &= \frac{3\mu^3}{2\lambda^2\lambda' + 3\mu^3 + 6\mu^2\lambda + 6\lambda^2\mu}; \\ f_1 &= \frac{6\mu^2\lambda}{2\lambda^2\lambda' + 3\mu^3 + 6\mu^2\lambda + 6\lambda^2\mu}; \\ f_2 &= \frac{6\mu\lambda^2}{2\lambda^2\lambda' + 3\mu^3 + 6\mu^2\lambda + 6\lambda^2\mu}; \\ f_3 &= \frac{2\lambda^2\lambda'}{2\lambda^2\lambda' + 3\mu^3 + 6\mu^2\lambda + 6\lambda^2\mu}. \end{aligned}$$

Пример 4.5. Элементы системы работают по схеме скользящего резерва (см. рис. 4.3, д). Значения интенсивности отказов и восстановлений соответственно $\lambda = 2 \cdot 10^{-4}$ 1/ч, $\mu = 2,5 \cdot 10^{-2}$ 1/ч.

Определить основные показатели надежности в предположении, что при отказе двух генераторов нагрузка оставшегося исправным не изменяется ($\lambda' = \lambda$).

Решение. Воспользовавшись полученными формулами, запишем: вероятность исправной работы

$$P(t) = e^{-4 \cdot 10^{-4} t};$$

вероятность отказа одного элемента за время t

$$F_1(t) = 4 \cdot 10^{-4} t e^{-4 \cdot 10^{-4} t};$$

вероятность отказа двух элементов

$$F_2(t) = 4e^{-2 \cdot 10^{-4} t} - 4e^{-4 \cdot 10^{-4} t}(1 + 2 \cdot 10^{-4} t);$$

вероятность отказа трех элементов (отказ системы)

$$F_3(t) = 1 - 4e^{-2 \cdot 10^{-4} t} + 3e^{-4 \cdot 10^{-4} t} + 4 \cdot 10^{-4} t e^{-4 \cdot 10^{-4} t};$$

средняя наработка до отказа

$$T_{\text{ср}} = \frac{2}{\lambda} = 10\,000 \text{ ч};$$

стационарное значение вероятности нахождения системы в произвольный момент времени t в исправном состоянии

$$p = \frac{46,875 \cdot 10^{-6}}{16 \cdot 10^{-12} + 46,875 \cdot 10^{-6} + 75 \cdot 10^{-8} + 6 \cdot 10^{-9}} = 0,984;$$

стационарное значение вероятности того, что отказал один элемент системы

$$f_1 = \frac{75 \cdot 10^{-8}}{16 \cdot 10^{-12} + 46,875 \cdot 10^{-6} + 75 \cdot 10^{-8} + 6 \cdot 10^{-9}} = 0,016;$$

стационарные значения вероятности того, что отказали два и три элемента

$$f_2 \approx f_3 \approx 0.$$

Контрольные вопросы

1. В чем состоит условное понятие «сложная система»?
2. Какие факторы отрицательно влияют на надежность сложных систем?
3. Какие основные свойства положительно влияют на надежность сложных систем?
4. Какими особенностями обладает элемент как составная часть сложной системы?
5. Назовите три структуры сложных систем с позиции их надежности. Какая структура наиболее характерна для современных технических систем?
6. Для чего применяют расчленение сложных систем на отдельные независимые элементы при расчетах надежности?
7. Для чего применяют метод резервирования элементов сложных систем?
8. Какие методы резервирования элементов сложных систем наиболее распространены в технике?

Математические модели надежности функционирования технических элементов и систем

5.1. Общая модель надежности технического элемента

Расчет надежности сложных технических систем часто базируется на предположении о том, что время безотказной работы и время восстановления элементов имеют экспоненциальные распределения вероятностей [19]. В гл. 3 показано, что это допущение приводит к существенным ошибкам при вычислении показателей надежности. Более реальным является анализ надежности технических систем, если снять ограничения об экспоненциальности распределений времени до отказа, восстановления и случайных параметров, сопутствующих функционированию системы. К таким параметрам относятся:

- время между очередными сеансами контроля и время его проведения;
- момент подключения в работу резервных элементов;
- время между очередными профилактиками и время их проведения и т. п.

Напомним, что под элементом в теории надежности понимается любой технический объект, имеющий показатель надежности, самостоятельно учитываемый при расчетах.

Элемент с восстановлением имеет два возможных состояния:

- (0) — элемент работает;
- (1) — элемент восстанавливается.

Пусть $Y_0(s, t)$ — вероятность того, что на интервале $[t, t + s]$ элемент находится в исправном состоянии, а $Y_1(\tau, t)$ — вероятность того, что на интервале $[t, t + \tau]$ элемент восстанавливается. Про дифференцируем эти функции:

$$y_0(s, t) = -\frac{\partial Y_0(s, t)}{\partial s}, \quad y_1(\tau, t) = -\frac{\partial Y_1(\tau, t)}{\partial \tau}.$$

Функция $y_0(s, t)$ представляет собой плотность распределения вероятностей исправной работы элемента в интервале времени

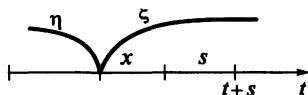


Рис. 5.1. Фрагмент диаграммы, поясняющий образование интегральных уравнений:

ξ — случайное время исправной работы элемента; η — случайное время восстановления элемента; t — момент времени, при котором элемент исправен; x — произвольный момент времени, взятый на промежутке от 0 до t ; s — время, в течение которого элемент исправен

$[t, t + s]$, а функция $y_1(\tau, t)$ — плотность распределения вероятностей времени восстановления элемента в интервале $[t, t + \tau]$.

Предположим, что в начальный момент времени $t = 0$ элемент находится в исправном состоянии, тогда

$$Y_0(s, 0) = \bar{F}(s), \quad Y_1(\tau, 0) = 0,$$

и потому

$$y_0(s, 0) = f(s), \quad y_1(\tau, 0) = 0.$$

Момент перехода из состояния восстановления в состояние исправной работы показан на рис. 5.1.

Вероятность того что элемент исправно работал в течение времени $x + s$ при условии, что в момент времени $t - x$ произошло его восстановление, равна $y_1(0, t - x)f(x + s)$.

Так как x — любой момент времени из интервала $[0; t]$, то в результате интегрирования этой функции от 0 до t получим уравнение

$$y_0(s, t) = \int_0^t f(x + s)y_1(0, t - x)dx + f(t + s),$$

в котором слагаемое $f(t + s)$ обусловлено началом процесса функционирования и означает, что при отсутствии отказа до момента t элемент работает безотказно в течение времени $(t + s)$. Аналогичное уравнение имеет место и для второй функции $y_1(\tau, t)$, но уже без свободного члена. Это позволяет записать следующую систему интегральных уравнений относительно функций y_0 и y_1 :

$$\left. \begin{aligned} y_0(s, t) &= \int_0^t f(x + s)y_1(0, t - x)dx + f(t + s); \\ y_1(\tau, t) &= \int_0^t g(x + \tau)y_0(0, t - x)dx. \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

Система уравнений (5.1) связывает между собой две функции, характеризующие процесс функционирования элемента. Это обусловлено наличием в аргументах функций $y_0(s, t)$ и $y_1(\tau, t)$ дополнительных переменных s и τ , которые соответствуют остаточному времени работы и восстановления элемента. Если остаточное время работы и восстановления равно нулю, то функции $\omega(t) = y_0(0, t)$ и $\omega_b(t) = y_1(0, t)$ являются параметрами потока отказов и восстановления соответственно. Обозначая $\varphi_s(t) = \varphi(t + s)$, получим

$$\begin{aligned} y_0(s, t) &= \omega_b f_s(t) + f_s(t); & y_1(\tau, t) &= \omega g_\tau(t); \\ Y_0(s, t) &= \omega_b \bar{F}_s(t) + \bar{F}_s(t); & Y_1(\tau, t) &= \omega \bar{G}_\tau(t). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Последние формулы дают возможность выразить вероятности Y_0 при малых s и Y_1 при малых τ через важнейшие характеристики элемента: функции готовности и простоя и параметры потока отказов и восстановлений. Выражения имеют вид

$$Y_0(s, t) = K_r(t) - \omega(t)s + o(s^2); \quad Y_1(\tau, t) = K_n(t) - \omega_b(t)\tau + o(\tau^2),$$

где K_r и K_n — коэффициенты готовности и простоя; o — бесконечно малая величина.

Тогда

$$\begin{aligned} K_r(t) &= Y_0(0, t) = \int_0^\infty y_0(s, t) ds; \\ K_n(t) &= Y_1(0, t) = \int_0^\infty y_1(\tau, t) d\tau. \end{aligned}$$

Полагая, что в формуле (5.2) $s = 0$ и $\tau = 0$, получим

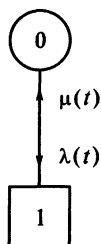
$$\omega(t) = \omega_b * f(t) + f(t), \quad \omega_b(t) = \omega * g(t). \quad (5.3)$$

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} f^{(k+1)} g^{(k)}(t); \\ \omega_b(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} f^{(k)} g^{(k)}(t). \end{aligned}$$

Вероятности $p_0(t)$ и $p_1(t)$ пребывания элемента в исправном состоянии и состоянии отказа, очевидно, совпадают соответственно с функциями готовности и простоя. Нетрудно показать, что

Рис. 5.2. Граф состояний восстанавливаемого элемента



эти вероятности удовлетворяют уравнениям, аналогичным уравнениям Эрланга

$$\left. \begin{aligned} p_0'(t) &= -\lambda(t)p_0(t) + \mu(t)p_1(t); \\ p_1'(t) &= \lambda(t)p_0(t) + \mu(t)p_1(t). \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

Здесь $\lambda(t)$ и $\mu(t)$ — интенсивности потока отказов и восстановлений (см. подразд. 2.6). Отсюда следует, что работу элемента можно описать простейшим графом состояний (рис. 5.2), в ветвях которого находятся функции $\lambda(t)$ и $\mu(t)$. Этому графу соответствует система обыкновенных дифференциальных уравнений (5.4) и функции $p_1(t)$ удовлетворяют начальным условиям: $p_0(0) = 1$, $p_1(0) = 0$, означающим, что в момент времени $t = 0$ элемент исправен.

Следует иметь в виду, что решить систему уравнений (5.1) проще, чем вначале определять интенсивность $\lambda(t)$ и $\mu(t)$, а затем решать систему дифференциальных уравнений (5.4).

Это позволяет записать для оценки надежности математическую модель функционирования любой сложной системы. В следующем разделе мы получим такую модель в достаточно общей для задач теории надежности ситуации, однако для ее составления применим несколько иной способ.

Пример 5.1. Предположим, что время безотказной работы и время восстановления элемента имеют экспоненциальные распределения с параметрами λ и μ соответственно.

Требуется получить выражения для параметров потоков отказов и восстановлений, среднего суммарного числа отказов и восстановлений в течение времени $[0; t]$, функций готовности и простоя, средней суммарной наработки и суммарного времени восстановления элемента в интервале времени $[0; t]$.

Решение. Из соотношений (5.3) на основании подразд. 2.6 параметры потоков отказов и восстановлений в преобразовании Лапласа имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{\omega}(z) &= \frac{\hat{f}(z)}{1 - \hat{f}(z)\hat{g}(z)} = \frac{\lambda(z + \mu)}{z(z + \mu + \lambda)}; \\ \omega_{\Sigma}(z) &= \frac{\hat{f}(z)\hat{g}(z)}{1 - \hat{f}(z)\hat{g}(z)} = \frac{\lambda\mu}{z(z + \mu + \lambda)}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\omega(t) = \frac{\mu\lambda}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda^2}{\mu + \lambda} e^{-(\mu+\lambda)t};$$

$$\omega_b(t) = \frac{\mu\lambda}{\mu + \lambda} + \frac{\mu\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu+\lambda)t}.$$

На основании формул, приведенных в подразд. 2.6, определим среднее суммарное число отказов и среднее суммарное число восстановлений в интервале времени $[0; t]$:

$$M(t) = \int_0^t \omega(x) dx = \frac{\mu\lambda}{\mu + \lambda} t + \frac{\lambda^2}{(\mu + \lambda)^2} (1 - e^{-(\mu+\lambda)t});$$

$$M_b(t) = \int_0^t \omega_b(x) dx = \frac{\mu\lambda}{\mu + \lambda} t - \frac{\mu\lambda}{(\mu + \lambda)^2} (1 - e^{-(\mu+\lambda)t}).$$

Из соотношений $K_r(t) = \bar{F}(t) + \omega_b \bar{F}(t)$, $K_n(t) = \omega \bar{G}(t)$ (см. подразд. 2.6) и формулы (5.3) функции готовности и простоя в преобразовании Лапласа имеют вид

$$\hat{K}_r(z) = \frac{1 - \hat{f}(z)}{z(1 - \hat{f}(z)\hat{g}(z))} = \frac{(z + \mu)}{z(z + \mu + \lambda)};$$

$$\hat{K}_n(z) = \frac{\hat{f}(z)(1 - \hat{g}(z))}{z(1 - \hat{f}(z)\hat{g}(z))} = \frac{\lambda}{z(z + \mu + \lambda)}.$$

Отсюда

$$K_r(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu+\lambda)t};$$

$$K_n(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu+\lambda)t}.$$

На основании формул подразд. 2.6 определим среднее суммарное время безотказной работы и среднее суммарное время восстановления в течение времени $[0; t]$:

$$m(t) = \int_0^t K_r(x) dx = \frac{\mu}{\mu + \lambda} t + \frac{\lambda}{(\mu + \lambda)^2} (1 - e^{-(\mu+\lambda)t});$$

$$m_b(t) = \int_0^t K_n(x) dx = \frac{\mu}{\mu + \lambda} t - \frac{\lambda}{(\mu + \lambda)^2} (1 - e^{-(\mu+\lambda)t}).$$

Приведенные соотношения будут использоваться в дальнейшем. Для распределений, отличных от экспоненциального (за редким исключением), не удастся получить явных соотношений для рассмотренных показателей надежности.

5.2. Общая модель надежности систем в терминах интегральных уравнений

5.2.1. Основные обозначения и допущения

Предположим, что техническая система состоит из m элементов с известными распределениями времени безотказной работы и времени восстановления, а ее функционирование осуществляется в соответствии с заданной схемой расчета надежности [19]. Все элементы условно разделим на рабочие и резервные. К первым отнесем все элементы нагруженного и облегченного резерва, а ко второму — только элементы, находящиеся в ненагруженном состоянии. При отказе рабочего элемента и при наличии резервного он заменяется резервным, причем эта замена осуществляется мгновенно и абсолютно надежным устройством. Ограничение о мгновенной замене можно снять. При наличии нескольких резервных элементов порядок замены отказавшего рабочего элемента резервным будем считать известным. Предполагается, что число ремонтных бригад и порядок восстановления отказавших элементов известны, т. е. имеется указание о том, какие элементы и в какой последовательности будут приняты на обслуживание. Восстановление элемента начинается сразу же после его отказа или после обнаружения отказа контролирующим устройством при наличии свободной бригады или по очереди, согласно принятому приоритету обслуживания. В процессе ремонта элементов происходит полное восстановление их надежности.

На функционирование и на ремонт каждого элемента могут оказывать влияние остальные элементы системы. В связи с этим, любой элемент может пребывать в нескольких возможных состояниях: в состоянии работоспособности, в состоянии восстановления или в состоянии простоя. Причем состояние простоя элемента может быть обусловлено следующими причинами:

- произошло прерывание работы элемента, что может быть в том случае, если данный элемент находится в составе узла, соединенного последовательно с отказавшим элементом или узлом;
- произошло прерывание восстановления элемента, что может быть в том случае, когда дисциплина обслуживания системы такова, что ремонтные органы, восстанавливающие данный элемент, прекращают его восстановление и приступают к ремонту некоторого другого элемента (восстановление с приоритетом);
- элемент исправен, но по условиям функционирования он находится в очереди на работу, что может произойти, например, в случае ненагруженного резервирования;
- элемент находится в состоянии отказа, но по условиям обслуживания он не ремонтируется и находится в очереди на вос-

становление, что возможно, например, в случае ограниченного восстановления с прямым или назначенным приоритетом.

Указание возможных состояний каждого элемента системы существенно при описании ее функционирования в целом. Будем считать, что переход каждого элемента из одного состояния в другое осуществляется мгновенно вследствие отказа или восстановления данного элемента или какого-либо другого элемента системы.

5.2.2. Матрица состояний

Множество всех состояний системы обозначим через E , а через n — число этих состояний. В соответствии с заданным понятием отказа все состояния системы разбиваются на два класса: множество работоспособных состояний E_+ и множество отказовых состояний E_- . В каждый фиксированный момент времени t и для каждого k -го состояния определяются шесть подмножеств множества всех элементов:

R_k — множество номеров работающих элементов;

W_k — множество номеров ремонтируемых элементов;

R_k — множество номеров элементов, находящихся в состоянии простоя вследствие прерывания их функционирования;

W_k — множество номеров элементов, находящихся в состоянии простоя вследствие прерывания их восстановления;

R_k^0 — множество номеров элементов, образующих очередь на работу;

W_k^1 — множество номеров элементов, образующих очередь на восстановление.

С каждым k -м состоянием ($k \in E$) свяжем вектор $A_k = (a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{mk})$, характеризующий состояния всех элементов системы в момент времени t . Компоненты вектора A_k предполагаются равными:

$$a_{ik} = \begin{cases} s_i, & \text{если } i \in R_k \cup R'_k; \\ \tau_i, & \text{если } i \in W_k \cup W'_k; \\ 0, & \text{если } i \in R_k^0 \cup W_k^0. \end{cases}$$

Если $i \in R'_k (i \in W'_k)$, то соответствующую компоненту будем иногда снабжать штрихом и писать $s'_i (\tau'_i)$. Если $a_{ik} = 0$, то соответствующую компоненту будем называть «нулевой» и для различия состояний будем писать $a_{ik} = OR$, если i -й элемент находится в очереди на работу, или $a_{ik} = OW$, если i -й элемент находится в очереди на восстановление. «Нулевая» компонента должна содержать также четкое указание о порядковом номере очереди на работу или очереди на восстановление, если таких компонент более

одной. В некоторых случаях, когда можно упростить решение, «нулевые» компоненты мы будем опускать.

Таким образом, функционирование любой восстанавливаемой системы полностью определяется матрицей состояний S размерности $m \times n$, столбцами которой служат векторы A_k .

Для удобства матрица состояний дополняется верхней строкой, содержащей коды (или номера) соответствующих состояний, например совокупностью (упорядоченной или неупорядоченной) отказавших элементов, и нижней строкой, показывающей, к какому классу (E_+ или E_-) относится состояние с номером $k = 1$, если $k \in E_+$, или $K = 0$, если $k \in E_-$.

5.2.3. Матрица переходов

При изучении процесса функционирования систем часто бывает удобно использовать понятия теории графов. Введем некоторые определения.

Графом называется тройка (E, D, T) , где E и D — конечные множества, а T — отображение из множества D в декартово произведение $E \times E$ [22]. Элементы множества E называются *узлами* (вершинами) графа, а элементы множества D — *ветвями* (*дугами*) графа. Отображение T каждой ветви графа $d \in D$ сопоставляет упорядоченную пару его узлов (k_1, k_2) , $k_1 k_2 \in E$, первый из которых называется началом ветви d , а второй — концом ветви d . Граф может быть изображен с помощью рисунка, на котором узлам соответствуют точки, а ветвям — линии со стрелками, идущими от начала к концу. Пусть заданы последовательность узлов $k_0, k_1, k_2, \dots, k_r$ графа и последовательность ветвей d_1, d_2, \dots, d_r . Будем называть эту пару последовательностей *путем*, если узел k_{j-1} является началом, а узел k_j является концом ветви d_j , $j = 1, 2, \dots, r$. Узел k_0 называется *началом пути*, а узел k_r — *концом пути*, число r называется *длиной пути*.

Функционирование восстанавливаемой (и невозстанавливаемой) системы может быть описано графом состояний. Множество всех состояний системы E отождествим с множеством узлов графа. Возможным переходам системы из одного состояния в другое сопоставим множество всех ветвей графа D . Будем считать, что все переходы системы за один шаг вызваны или отказом, или восстановлением некоторого элемента системы. Тем самым исключается возможность одновременного отказа или восстановления более чем одного элемента системы.

Информация о всевозможных переходах системы за один шаг содержится в матрице переходов P размерности $m \times n$. Каждый элемент b_{ik} этой матрицы представляет собой код состояния, в которое имеется непосредственный переход из состояния с номе-

ром k вследствие изменения состояния (отказа или восстановления) i -го элемента. Если из состояния k отсутствует переход, вызванный изменением состояния i -го элемента, то соответствующее место матрицы P не заполняется. Таким образом, элементам матрицы P соответствуют ветви графа с началом в узле с кодом, соответствующим состоянию с номером k и с концом в узле с кодом b_{ik} . При этом в силу принятой нумерации состояний в матрице P дается указание о номере элемента, отказ или восстановление которого вызвало данный переход.

При изучении свойств технической системы с точки зрения надежности нет необходимости задавать множество всевозможных переходов, так как они полностью определяются состояниями системы и списком аргументов, связанных с этими состояниями. Тем самым матрица P может быть построена по матрице S программно. Для построения матрицы переходов нужно определить допустимые переходы для каждого элемента. Допустимыми являются переходы вида $s \rightarrow s, s', \tau, OW$; $\tau \rightarrow s, \tau, \tau', OR$; $s' \rightarrow s, s'$; $\tau' \rightarrow \tau, \tau'$; $OR \rightarrow s, OR$; $OW \rightarrow \tau, OW$.

Значения $s, s', \tau, \tau', OR, OW$ представляют собой характеристики состояния каждого элемента системы (см. подразд. 5.2.2). При этом переходы $s \rightarrow \tau$, или $s \rightarrow OW$ будем называть *отказовыми*, а переходы $\tau \rightarrow s$ или $\tau \rightarrow OR$ — *восстанавливающими*.

Чтобы определить существование перехода из состояния k в состояние l необходимо сопоставить между собой компоненты векторов $A_k = (a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{mk})$ и $A_l = (a_{1l}, a_{2l}, \dots, a_{ml})$. Непосредственный переход $k \rightarrow l$ существует вследствие отказа или восстановления элемента i_0 , если переход $a_{i_0k} \rightarrow a_{i_0l}$ является отказовым или восстанавливающим, а остальные поэлементные переходы $a_{ik} \rightarrow a_{il}$ допустимы, но не являются отказовыми или восстанавливающими. В этом случае b_{i_0k} равен коду состояния с номером 1. Таким путем может быть сформирована матрица P . Если переход $k \rightarrow l$ не существует, то соответствующий элемент матрицы P не заполняется.

Пример 5.2. Составить матрицу и граф состояний для основного соединения трех элементов в предположении, что при отказе 1-го или 2-го элемента остальные элементы выключаются, а при отказе 3-го элемента остальные продолжают функционировать. Восстановление отказавших элементов производится одной ремонтной бригадой с обратным приоритетом.

Решение. Система имеет следующие состояния и соответствующие им векторы:

(0) — все элементы исправны, $A_0 = (s_1, s_2, s_3)$;

(1) — отказал и восстанавливается 1-й элемент, другие элементы простаивают вследствие прерывания их работы, $A_1 = (\tau_1, s'_2, s'_3)$;

(2) — отказал и восстанавливается 2-й элемент, другие элементы простаивают вследствие прерывания их работы, $A_2 = (s'_2, \tau_2, s'_3)$;

(3) — отказал и восстанавливается 3-й элемент, другие элементы продолжают работать, $A_3 = (s_1, s_2, \tau_3)$;

(31) — отказали 3-й, а затем 1-й элементы, восстанавливается 1-й элемент, 2-й простаивает вследствие прерывания работы, 3-й простаивает вследствие прерывания восстановления, $A_4 = (\tau_1, s'_2, \tau'_3)$;

(32) — отказали 3-й, а затем 2-й элементы, восстанавливается 2-й элемент, 1-й простаивает вследствие прерывания работы, 3-й простаивает вследствие прерывания восстановления, $A_5 = (s'_2, \tau'_2, \tau'_3)$.

Таким образом, матрица состояний имеет вид

$$S = \begin{array}{c|cccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 31 & 32 \\ \hline s_1 & \tau_1 & s'_1 & s_1 & \tau_1 & s'_1 & \\ s_2 & s'_2 & \tau_2 & s_2 & s'_2 & \tau_2 & \\ s_3 & s'_3 & s'_3 & \tau_3 & \tau'_3 & \tau'_3 & \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \end{array}$$

Граф состояний представлен на рис. 5.3. Граф имеет нумерацию узлов, принятую ранее.

В соответствии с общими принципами построения матрицы переходов она имеет вид

$$P = \begin{array}{c|cccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 31 & 32 \\ \hline 1 & 0 & & 31 & 3 & & \\ 2 & & 0 & 32 & & & 3 \\ 3 & & & 0 & & & \end{array}$$

Пример 5.3. Составить матрицу и граф состояний резервированной системы при общем постоянном резервировании кратности $m = 2$. Обслуживание отказавших элементов осуществляют два ремонтных органа с прямым приоритетом.

Решение. Система имеет следующие состояния:

- (0) — все элементы исправны;
- (k) — отказал и восстанавливается k-й элемент, другие элементы работают;
- (kl) — отказали и восстанавливаются элементы с номерами k и l, оставшийся элемент работает;
- (klm) — отказали и восстанавливаются элементы с номерами k и l, оставшийся элемент находится в очереди на восстановление.

Матрица состояний имеет вид

$$S = \begin{array}{c|cccccccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 12 & 13 & 23 & 123 & 132 & 231 \\ \hline s_1 & \tau_1 & s_1 & s_1 & \tau_1 & \tau_1 & s_1 & \tau_1 & \tau_1 & 0 & \\ s_2 & s_2 & \tau_2 & s_2 & \tau_2 & s_2 & \tau_2 & \tau_2 & 0 & \tau_2 & \\ s_3 & s_3 & s_3 & \tau_3 & s_3 & \tau_3 & \tau_3 & 0 & \tau_3 & \tau_3 & \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \end{array}$$

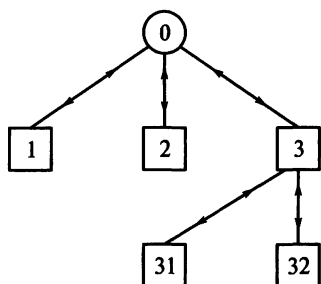


Рис. 5.3. Граф состояний системы из примера 5.2

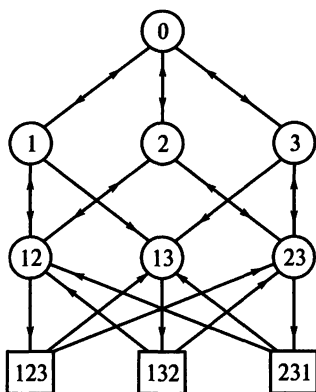


Рис. 5.4. Граф состояний системы из примера 5.3

Граф состояний представлен на рис. 5.4.

По графу легко составляется следующая матрица переходов:

$P =$

	0	1	2	3	12	13	23	123	132	231
1		0	12	13	2	3	231	23	23	
2		12		23	1	132	3	1		13
3		13	23		123	1	2	1	12	12

5.3. Модели надежности невосстанавливаемых систем

Оценка надежности технической системы без восстановления является значительно более простой задачей по сравнению с оценкой восстанавливаемой системы. Описание функционирования такой системы представляет собой частный случай математической модели системы при наличии восстановления.

Пусть E — множество состояний невосстанавливаемой системы. Тогда для любого состояния $k \in E$ естественным образом определяются множества R_k , R'_k , R_k^0 , характеризующие соответственно номера работающих элементов, элементов, находящихся в состоянии простоя по причинам прерывания их функционирования, и элементов, образующих очередь на работу. При этом условно будем считать, что отказавшие элементы становятся в очередь на восстановление, и номера этих элементов образуют множество W_k^0 . Множества W_k и W'_k характеризующие процесс восста-

новления элементов, являются пустыми. Таким образом, аргументы искоемых функций y_k равны s_i либо s'_i , либо нулю. В графе состояний отсутствуют все переходы, соответствующие восстановлению, и все пути графа имеют конечную длину, не превышающую количество уровней графа.

Пример 5.4. Описать функционирование невосстанавливаемой системы для основного соединения трех элементов.

Решение. Как и прежде, устройство имеет шесть возможных состояний и шесть неизвестных функций $y_0(s_1, s_2, s_3, t)$, $y_1(0, s'_2, s'_3, t)$, $y_0(s'_1, s'_3, t)$, $y_3(s_1, s_2, 0, t)$, $y_{31}(0, s'_2, 0, t)$, $y_{32}(s'_1, 0, 0, t)$. Считая, что в момент времени $t = 0$ все элементы исправны, будем иметь следующую систему интегральных уравнений:

$$y_0(s_1, s_2, s_3, t) = f_1(t + s_1)f_2(t + s_2)f_3(t + s_3);$$

$$y_1(0, s'_2, s'_3, t) = \int_0^t y_0(0, s_2, s_3, t - x)dx;$$

$$y_2(s'_1, 0, s'_3, t) = \int_0^t y_0(s_1, 0, s_3, t - x)dx;$$

$$y_3(s_1, s_2, 0, t) = \int_0^t y_0(x + s_1, x + s_2, 0, t - x)dx;$$

$$y_{31}(0, s'_2, 0, t) = \int_0^t y_3(0, s_2, 0, t - x)dx;$$

$$y_{32}(s'_1, 0, 0, t) = \int_0^t y_3(s_1, 0, 0, t - x)dx.$$

Все неизвестные функции определяются последовательной подстановкой:

$$y_0(s_1, s_2, s_3, t) = f_1(t + s_1)f_2(t + s_2)f_3(t + s_3);$$

$$y_1(0, s_2, s_3, t) = \int_0^t f_1(x)f_2(x + s_2)f_3(x + s_3)dx;$$

$$y_2(s_1, 0, s_3, t) = \int_0^t f_1(x + s_1)f_2(x)f_3(x + s_3)dx;$$

$$y_3(s_1, s_2, 0, t) = f_1(t + s_1)f_2(t + s_2)F_3(t);$$

$$y_{31}(0, s'_2, 0, t) = \int_0^t f_1(x)f_2(x + s_2)F_3(x)dx;$$

$$y_{32}(s'_1, 0, 0, t) = \int_0^t f_1(x + s_1)f_2(x)F_3(x)dx.$$

Далее находим вероятность состояний:

$$p_0(t)\bar{F}_1(t)\bar{F}_2(t)\bar{F}_3(t); \quad p_1(t) = \int_0^t f_1(x)\bar{F}_2(x)\bar{F}_3(x)dx;$$

$$p_2(t) = \int_0^t \bar{F}_1(x)f_2(x)\bar{F}_3(x)dx; \quad p_3(t) = \bar{F}_1(t)\bar{F}_2(t)F_3(t);$$

$$p_{32}(t) = \int_0^t f_1(x)\bar{F}_2(x)F_3(x)dx; \quad p_{32}(t) = \int_0^t \bar{F}_1(x)f_2(x)F_3(x)dx.$$

Нетрудно видеть, что сумма вероятностей равна единице, что может служить контролем правильности вычислений.

Пример 5.5. Описать функционирование невосстанавливаемой резервированной системы при постоянном резервировании кратности $m = 2$ (см. подразд. 5.2.3).

Решение. В графе состояний невосстанавливаемой системы отсутствуют все переходы с нижнего уровня на верхний. Мы не будем выписывать полностью систему интегральных уравнений, приведем только те уравнения, которые отвечают состояниям: 0; 1; 12; 123. Остальные уравнения составляются аналогично.

$$y_0(s_1, s_2, s_3, t) = f_1(t+s_1)f_2(t+s_2)f_3(t+s_3);$$

$$y_1(0, s_2, s_3, t) = \int_0^t y_0(0, x+s_2, x+s_3, t-x)dx;$$

$$y_{12}(0, 0, s_3, t) = \int_0^t y_1(0, 0, x+s_3, t-x)dx + \int_0^t y_2(0, 0, x+s_3, t-x)dx;$$

$$y_{123}(0, 0, 0, t) = \int_0^t y_{12}(0, 0, 0, t-x)dx.$$

Непосредственной подстановкой найдем решение этой системы:

$$y_0(s_1, s_2, s_3, t) = f_1(t+s_1)f_2(t+s_2)f_3(t+s_3);$$

$$y_1(0, s_2, s_3, t) = F_1(t)f_2(t+s_2)f_3(t+s_3);$$

$$y_{12}(0, 0, s_3, t) = \int_0^t F_1(x)f_2(x)dx f_3(t+s_3) + \\ + \int_0^t f_1(x)F_2(x)dx f_3(t+s_3) = F_1(t)F_2(t)f_3(t+s_3);$$

$$y_{123}(0, 0, 0, t) = \int_0^t F_1(x) F_2(x) f_3(x) dx.$$

Определим вероятности соответствующих состояний:

$$p_0(t) \bar{F}_1(t) \bar{F}_2(t) \bar{F}_3(t); \quad p_1(t) = F_1(t) \bar{F}_2(t) \bar{F}_3(t);$$

$$p_{12}(t) F_1(t) F_2(t) \bar{F}_3(t); \quad p_{123}(t) = \int_0^t F_1(x) F_2(x) f_3(x) dx.$$

Выписывая вероятности остальных состояний можно показать, что сумма вероятностей всех состояний равна единице.

Вычислим вероятность отказа системы:

$$F(t) = p_{123}(t) + p_{132}(t) + p_{231}(t),$$

или

$$\begin{aligned} F(t) &= \int_0^t F_1(x) F_2(x) f_3(x) dx + \int_0^t F_1(x) f_2(x) F_3(x) dx + \\ &+ \int_0^t f_1(x) F_2(x) F_3(x) dx = F_1(t) F_2(t) F_3(t). \end{aligned}$$

Следовательно, вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - F_1(t) F_2(t) F_3(t).$$

Контрольные вопросы

1. Какие два возможных состояния имеет элемент с восстановлением?
2. Приведите пример графа состояний восстанавливаемого элемента.
3. Что называется временем безотказной работы и временем восстановления?
4. Как следует понимать рабочий и резервный элементы системы?
5. Какие причины обуславливают состояние простоя элемента?
6. Для чего используют матрицу состояний элемента сложной системы в процессе создания математических моделей надежности?
7. Что называется графом состояний и как он изображается?
8. Какая из задач оценки надежности технических систем является более простой: а) системы без восстановления; б) восстанавливаемой системы?

Жизненный цикл технической системы и роль научно-технической подготовки производства по обеспечению требований ее качества

6.1. Структура жизненного цикла технической системы

Основные составляющие жизненного цикла любой технической системы показаны на рис. 6.1.

Основные составляющие жизненного цикла любого изделия следующие:

- 1) маркетинговые исследования потребностей рынка;
- 2) генерация идей и их фильтрация;
- 3) техническая и экономическая экспертиза проекта;
- 4) научно-исследовательские работы по тематике изделия;
- 5) опытно-конструкторская работа;
- 6) пробный маркетинг;
- 7) подготовка производства изделия на заводе—изготовителе серийной продукции);
- 8) собственно производство и сбыт;
- 9) эксплуатация изделий;
- 10) утилизация изделий.

Стадии 4—7 — предпроизводственные, и их можно рассматривать как комплекс научно-технической подготовки производства.

Основным содержанием целевых исследований в процессе управления жизненным циклом изделия является анализ прогнозируемого состояния объектов. При таком анализе возникают следующие вопросы:

- Какие факторы, условия и на каких стадиях следует подвергать оценке?
- Какой должна быть система критериев оценок?
- Какие методологические подходы и приемы следует использовать в ходе оценки?

Целесообразно в ходе управления жизненным циклом изделия опираться на систему контрольных точек цикла. На всех контрольных точках анализируют отклонения качественных и количественных параметров изделия от проектных значений по техни-

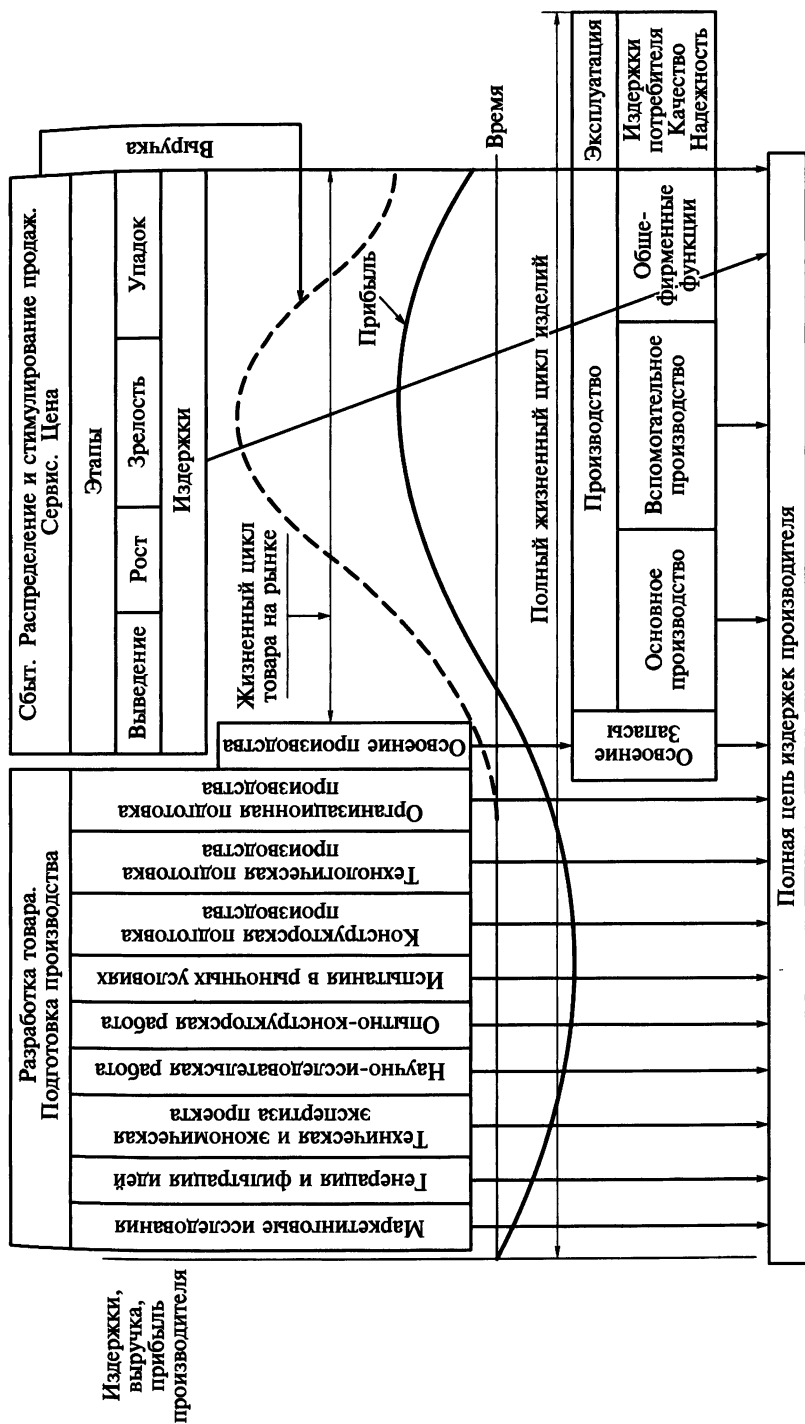


Рис. 6.1. Основные составляющие жизненного цикла любого изделия

ческим и экономическим критериям и вырабатывают соответствующие решения по критерию эффект — затраты.

Как уже указывалось, проведение НИР можно рассматривать как научную подготовку производства (НПП), ОКР — как основную часть конструкторской подготовки производства (КПП) и частично технологической (ТПП), а собственно подготовку производства на серийном заводе как окончание КПП, проведение в основном ТПП, а также организационной подготовки производства (ОПП). Влияние системы подготовки производства на формирование конечного эффекта разработки, производства и эксплуатации нового изделия показано на рис. 6.2.

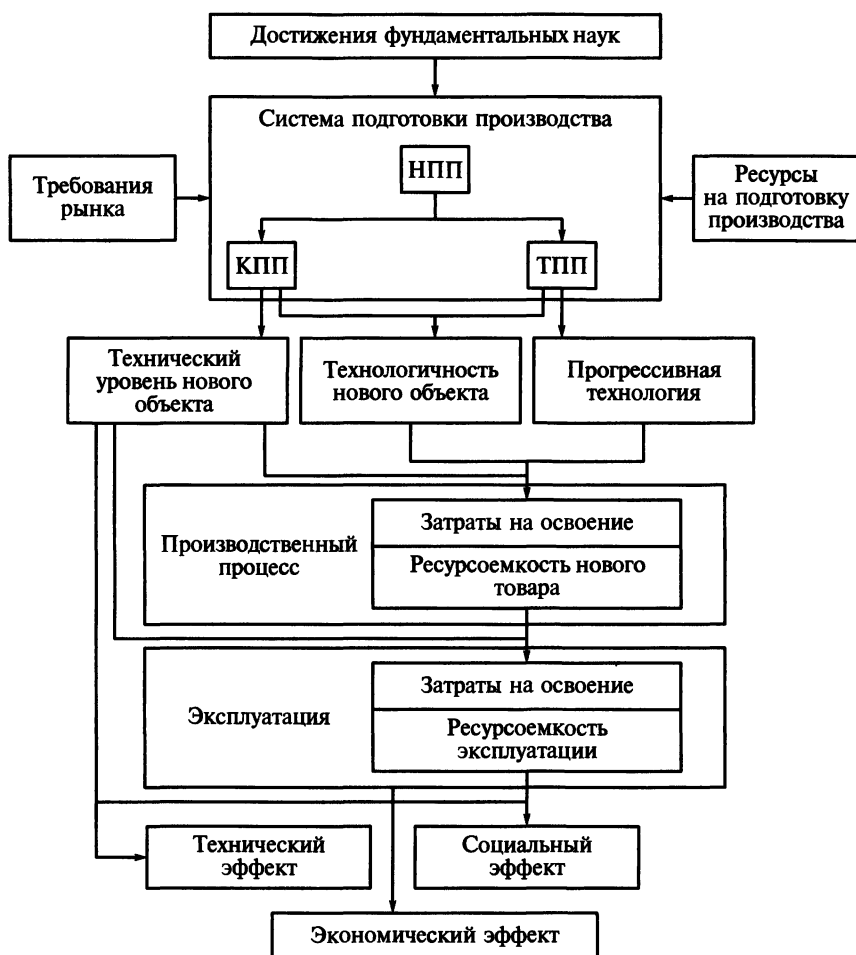


Рис. 6.2. Влияние системы подготовки производства на формирование конечного эффекта разработки и использования нового объекта

Длительности всех стадий жизненного цикла объекта (например, автомобиля) коренным образом влияют на его экономическую эффективность. Особое значение имеет сокращение сроков научно-технической подготовки производства, в том числе и обеспечение определенной параллельности выполнения отдельных этапов. Для этого необходимо:

- снизить до минимума все изменения, вносимые в изделие после передачи результатов от одного этапа к другому;
- определить и реализовать рациональную параллельность работ, фаз, стадий цикла;
- обеспечить сокращение затрат времени на выполнение отдельных этапов.

6.2. Комплексная система обеспечения качества изделия

Практически в большинстве контрольных точек жизненного цикла обеспечение и оценка качества объекта — одна из первоочередных задач. Поскольку качество определяет эффективность изделия и уровень рыночной цены на него, то огромное значение приобретает комплексный подход к обеспечению качества.

В управлении качеством продукции главным является его сопоставление с характером распределения потребностей в простран-



Рис. 6.3. Совокупность свойств объекта, влияющих на его эффективность

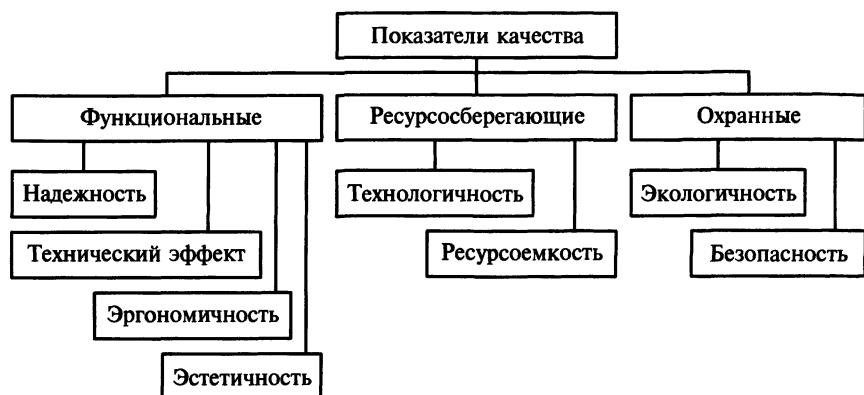


Рис. 6.4. Группировка показателей качества изделий по однородности

стве и времени, что и определяет эффективность изделия (рис. 6.3). Показатели качества изделия группируются по видам и группам характеризующих свойств (рис. 6.4).

Состав основных видов обеспечения качества продукции содержит следующие группы факторов:

- технические (метрологические, технологические, конструктивные факторы);
- экономические (финансовые, нормативные, материальные факторы);
- социальные (организационные, правовые, кадровые факторы).

Комплексное использование всех этих факторов и их компонентов — основное условие успешного функционирования системы управления качеством продукции. Этот опыт обобщен в серии международных стандартов ИСО 9000, на основе которых издана серия отечественных стандартов ГОСТ 40.9000. В соответствии с этими стандартами существует тесная связь стадий жизненного цикла и качества. Это отражается в так называемой петле качества (рис. 6.5).

Под *уровнем качества* изделия понимаются относительные характеристики качества (или его обобщенная характеристика) по сравнению с совокупностью базовых показателей, в качестве которых используются показатели перспективных образцов, аналогов и стандартов. Под *аналогом* подразумевается образец серийного производства устройства, принцип действия, функциональное назначение, масштабы производства и условия применения которого те же, что и у проектируемого изделия.

Типовая схема оценки уровня качества изделия приведена на рис. 6.6.

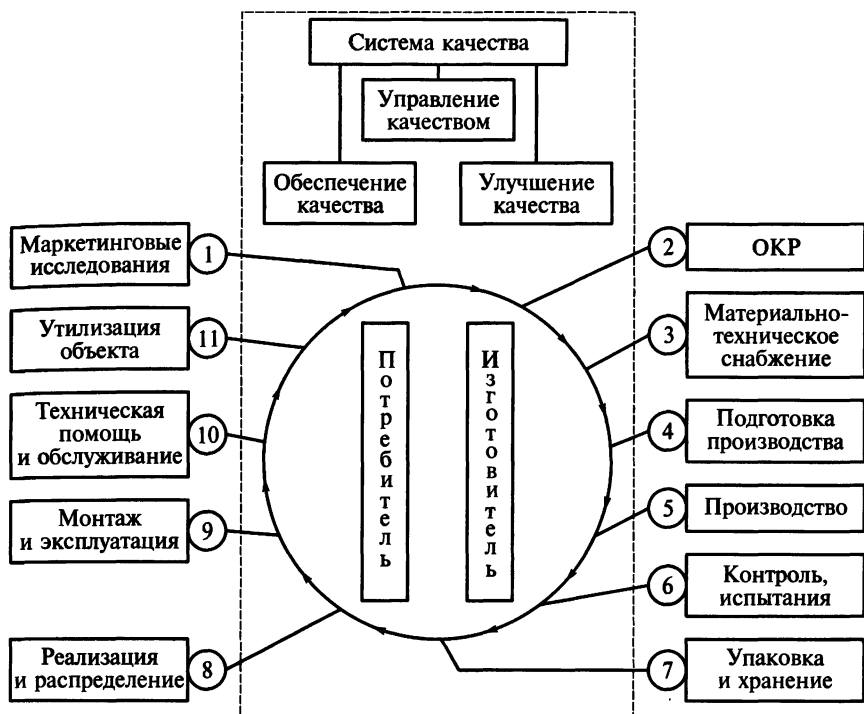


Рис. 6.5. Жизненный цикл («петля качества») продукции по стандарту ИСО 9004

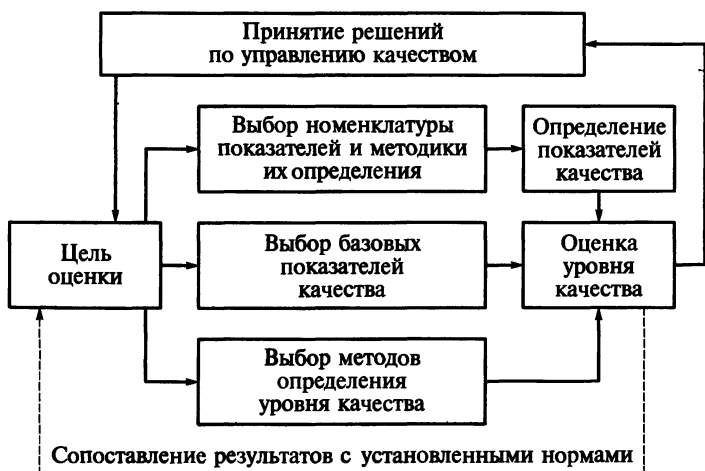


Рис. 6.6. Схема оценки уровня качества изделий

6.3. Оценка уровня качества и управление надежностью

6.3.1. Международные стандарты качества ИСО серии 9000—2000

Требования к надежности, как основной составляющей качества, определяются отечественными и международными стандартами, соблюдение которых является обязательным условием для успешного функционирования предприятия — производителя продукции или услуг в любой отрасли промышленности или сфере экономики.

Для равноправного участия Российской Федерации в мировой экономике уже недостаточно использовать в отечественной производственной сфере лишь национальные стандарты качества. Необходимо, чтобы выпускаемая продукция была конкурентоспособной, а ее качество соответствовало общепринятым международным стандартам.

Ведущее место в области организационно-методического обеспечения сертификации принадлежит Международной организации по стандартизации (*The International Organization on Standardization — ISO*) в русской транскрипции (ИСО), которая имеет Комитет по сертификации (СЕГТИКО). В 1985 г. разработана система сертификации и подготовлены известные стандарты ИСО серии 9000, опубликованные в 1987 г.

В 1991 г. Генеральная ассамблея Европейского комитета стандартов (СЕН) — Международной организации по стандартизации стран — членов Общего рынка утвердила Правила внедрения и использования систем сертификации и взаимного признания странами ЕЭС результатов испытания.

Любая продукция, изготовленная и проданная на законном основании в одной стране, являющейся членом ЕЭС, должна быть допущена на рынки других стран сообщества.

Международные стандарты ИСО по системам качества включают в себя пять наименований:

ИСО 9000 «Общее руководство качеством и стандарты по обеспечению качества. Руководящие указания по выбору и применению»;

ИСО 9001 «Система качества. Модель для обеспечения качества при проектировании и(или) разработке, производстве, монтаже и обслуживании»;

ИСО 9002 «Система качества. Модель для обеспечения качества при производстве и монтаже»;

ИСО 9003 «Система качества. Модель для обеспечения качества при окончательном контроле и испытаниях»;

ИСО 9004 «Общее руководство качеством и элементы системы качества. Руководящие указания».

Система управления качеством продукции должна удовлетворять требованиям качества по стандартам ИСО:

- 9001 — требования к системе контроля и испытаний продукции, сертификации надежности;
- 9002 — требования к системе организации производства;
- 9003 — требования к системе управления качеством от проектирования до эксплуатации.

Потребителям автомобильного транспорта необходима продукция, характеристики которой удовлетворяли бы их потребности и ожидания. Эти потребности и ожидания, как правило, отражаются в технических условиях на продукцию и обычно считаются требованиями потребителей. Требования могут быть установлены потребителем в контракте или определены самой организацией. Поскольку потребности и ожидания потребителей меняются, организации также испытывают давление, обусловленное конкуренцией и техническим прогрессом, они должны постоянно совершенствовать свою продукцию и свои процессы.

Свидетельство о том, что компания соответствует стандартам ИСО 9000, может быть выдано только независимым аккредитованным агентством регистрации. Как правило, регистратор проводит предварительную ревизию для определения несоответствия, которое можно было бы исправить перед регистрационным аудитом.

Сертификат регистрации ИСО 9000 действителен в течение 3 лет, однако агентство регистрации может проводить ревизии с интервалом в 6 мес, чтобы убедиться, что компания продолжает следовать стандартам качества.

Системный подход к менеджменту качества побуждает организации анализировать требования потребителей, определять процессы, способствующие получению продукции, приемлемой для потребителей, а также поддерживать эти процессы в управляемом состоянии.

Требования к системам менеджмента качества установлены в ГОСТ Р ИСО 9001, являются общими и применимыми к организациям в любых секторах промышленности или экономики независимо от категории продукции.

Для получения сертификата соответствия стандартам ИСО 9000 предприятие должно соответствовать определенным стандартам при проверке качества, подтвержденным независимым агентством регистрации. ***Сертифицируется не продукт или услуга, а система проверки качества.*** Сертификация ИСО 9000 гарантирует клиентам, что эта компания имеет достаточно налаженную систему, чтобы обеспечить соответствие любого изделия или услуги,

которые она предлагает, всем международным стандартам качества.

Компании, которые сертифицируются ИСО 9000, получают меньше жалоб от клиентов, несут меньше эксплуатационных расходов и получают рост спроса на свои изделия или услуги. Стандарт ИСО 9001 предъявляет требования по проверке качества для продукции предприятий любых отраслей промышленности или секторов экономики без исключения. Решение относительно того, проходить ли сертификацию, принимает менеджмент предприятия в зависимости от того, чего ожидают от их продукции клиенты или требует рынок. Некоторые компании, например, не покупают готовые изделия и запасные части от изготовителей, которые не зарегистрированы ИСО 9000.

Два стандарта ИСО 9001 и ИСО 9002 почти идентичны. Однако ИСО 9001 применяется к компаниям, занимающимся разработкой изделий или услуг, а также их производством, установкой или внедрением; ИСО 9002 просто исключает элементы разработки из похожей модели проверки качества.

Другие критерии стандартов проверки качества включают Стандарты Качества (QS) 9000 для ряда компаний, производящих запасные части для автомобильной промышленности, и ИСО 14000 для компаний, вовлеченных в деятельность, связанную с экологией.

6.3.2. Контроль качества и его методы

Особое место в управлении качеством продукции занимает контроль качества. Именно контроль как одно из эффективных средств достижения намеченных целей и важнейшая функция управления способствует правильному использованию объективно существующих, а также созданных человеком предпосылок и условий выпуска продукции высокого качества. От степени совершенства контроля качества, его технического оснащения и организации во многом зависит эффективность производства в целом.

Именно в процессе контроля осуществляется сопоставление фактически достигнутых результатов функционирования системы с запланированными. Современные методы контроля качества продукции, позволяющие при минимальных затратах достичь высокой стабильности показателей качества, приобретают все большее значение.

Контроль качества независимо от совершенства применяемых для этого методик предполагает прежде всего отделение хороших объектов от плохих. Естественно, что качество объекта не повышается за счет выбраковки некачественных.

Контроль — это процесс определения и оценки информации об отклонениях действительных значений от заданных или их совпадении и результатах анализа. Контролировать можно цели, ход выполнения плана, прогнозы, развитие процесса.

Предметом контроля может быть не только исполнительская деятельность, но и работа менеджера. Контрольная информация используется в процессе регулирования.

Контроль осуществляется лицами, прямо или косвенно зависящими от процесса.

Проверка (ревизия) — это контроль лицами, не зависящими от процесса.

Виды контроля различают по следующим признакам:

1) по принадлежности субъекта контроля к предприятию:

- внутренний;
- внешний;

2) по основанию для проведения контроля:

- добровольный;
- по закону;
- по уставу;

3) по объекту контроля:

- контроль за процессами;
- контроль за решениями;
- контроль за объектами;
- контроль за результатами;

4) по регулярности:

- системный;
- нерегулярный;
- специальный.

Контроль качества должен подтверждать выполнение заданных требований к продукции и включать в себя:

- входной контроль (материалы не должны использоваться в процессе без контроля; проверка входящего продукта должна соответствовать плану качества, закрепленным процедурам и может иметь различные формы);

- промежуточный контроль (организация должна иметь специальные документы, фиксирующие процедуру контроля и испытаний внутри процесса, и осуществлять этот контроль систематически);

- окончательный контроль (для выявления соответствия между фактическим конечным продуктом и тем, который предусмотрен планом по качеству; включает в себя результаты всех предыдущих проверок и отражает соответствие продукта необходимым требованиям);

- регистрацию результатов контроля и испытаний (документы о результатах контроля и испытаний предоставляются заинтересованным организациям и лицам).

Особым видом контроля являются испытания готовой продукции.

Испытание — это определение или исследование одной или нескольких характеристик изделия под воздействием совокупности физических, химических, природных или эксплуатационных факторов и условий. Испытания проводятся по соответствующим программам. В зависимости от целей существуют следующие основные виды испытаний:

- предварительные испытания — испытания опытных образцов для определения возможности приемочных испытаний;
- приемочные испытания — испытания опытных образцов для определения возможности их постановки на производство;
- приемосдаточные испытания — испытания каждого изделия для определения возможности его поставки заказчику;
- периодические испытания — испытания, которые проводят 1 раз в 3—5 лет для проверки стабильности технологии производства;
- типовые испытания — испытания серийных изделий после внесения существенных изменений в конструкцию или технологию.

Точность измерительного и испытательного оборудования влияет на достоверность оценки качества, поэтому обеспечение его качества особенно важно.

Из нормативных документов, регламентирующих метрологическую деятельность, выделяют Закон Российской Федерации от 27.04.1993 № 4871-1 «Об обеспечении единства измерений» и международный стандарт ИСО 10012-1 о подтверждении метрологической пригодности измерительного оборудования.

Международный стандарт ИСО 10012-1 был подготовлен Подкомитетом ПК 3 «Вспомогательные методики» Технического комитета ИСО ТК 176 «Управление качеством и обеспечение качества».

Стандарт ИСО 10012 состоит из двух частей, объединенных общим заголовком «Требования по обеспечению качества измерительного оборудования»:

- часть 1. Система метрологического подтверждения для измерительного оборудования;
- часть 2. Обеспечение измерений.

При управлении контрольным, измерительным и испытательным оборудованием организация должна:

- определить, какие измерения должны быть сделаны, какими средствами и с какой точностью;
- оформить документально соответствие оборудования необходимым требованиям;
- регулярно проводить калибровку (проверку делений прибора);
- определить методику и периодичность калибровки;

- документально оформлять результаты калибровки;
- обеспечить условия применения измерительной техники с учетом параметров окружающей среды;
- устранять неисправные или непригодные контрольно-измерительные средства;
- производить регулировку оборудования и программного обеспечения с помощью только специально обученного персонала.

Прохождение контроля и испытаний продукции должно подтверждаться наглядно (например, с помощью этикеток, бирок, пломб и т.д.). Те продукты, которые не соответствуют критериям проверки, отделяются от остальных.

Также необходимо определить специалистов, ответственных за проведение такого контроля и установить их полномочия.

Эффективная система контроля позволяет в большинстве случаев осуществлять своевременное и целенаправленное воздействие на уровень качества выпускаемой продукции, предупреждать всевозможные недостатки и сбои в работе, обеспечивать их оперативное выявление и ликвидацию с наименьшими затратами ресурсов. Положительные результаты действенного контроля качества можно выделить и в большинстве случаев определить количественно на стадиях разработки, производства, обращения, эксплуатации (потребления) и восстановления (ремонта) продукции.

6.3.3. Методы контроля качества, анализа дефектов и их причин

Технический контроль — это проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям, составная и неотъемлемая часть производственного процесса. Контролю подвергаются:

- поступающие на предприятие сырье, материалы, топливо, полуфабрикаты, комплектующие изделия;
- производимые заготовки, детали, сборочные единицы;
- готовые изделия;
- оборудование, оснастка, технологические процессы изготовления продукции.

Основные задачи технического контроля заключаются в обеспечении выпуска качественной продукции в соответствии со стандартами и ТУ, выявлении и предупреждении брака, проведении мер по дальнейшему улучшению качества изделий.

К настоящему времени сложились разнообразные методы контроля качества, которые можно разбить на две группы:

самопроверка или **самоконтроль** — персональная проверка и контроль оператором с применением методов, установленных технологической картой на операцию, а также с использованием

предусмотренных измерительных средств с соблюдением заданной периодичности проверки;

ревизия (проверка) — проверка, осуществляемая контролером, которая должна соответствовать содержанию карты контроля технологического процесса.

В зависимости от характера дефектов брак может быть исправимым или неисправимым (окончательным). В первом случае изделия после исправления могут быть использованы по назначению, во втором — исправление технически производить невозможно или экономически нецелесообразно. Устанавливаются виновники брака и намечаются мероприятия по его предупреждению. Виды технического контроля показаны в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Классификация технического контроля

Классификационный признак	Вид технического контроля
По назначению	Входной (продукции от поставщиков) Производственный Инспекционный (контроль контроля)
По стадиям технологического процесса	Операционный (в процессе изготовления) Приемочный (готовой продукции)
По методам контроля	Технический осмотр (визуальный) Измерительный Регистрационный Статистический
По полноте охвата контролем производственного процесса	Сплошной Выборочный Летучий Непрерывный Периодический
По механизации контрольных операций	Ручной Механизированный Полуавтоматический Автоматический
По влиянию на ход обработки	Пассивный (с остановкой процесса обработки и после обработки) Активный (контроль во время обработки и остановка процесса при достижении необходимого параметра) Активный с автоматической подналадкой оборудования

Классификационный признак	Вид технического контроля
По измерению зависимых и независимых допустимых отклонений	Измерение действительных отклонений Измерение предельных отклонений с помощью проходимых и непроходимых калибров
В зависимости от объекта контроля	Контроль качества продукции Контроль товарной и сопроводительной документации Контроль технологического процесса Контроль средств технологического оснащения Контроль технологической дисциплины Контроль прохождения рекламаций Контроль соблюдения требований эксплуатации
По влиянию на возможность последующего использования	Разрушающий Неразрушающий

При контроле качества продукции используются физические, химические и другие методы, которые можно подразделить на две группы: разрушающие и неразрушающие.

К *разрушающим методам* относятся:

- испытания на растяжение и сжатие;
- испытания на удар;
- испытания при повторно-переменных нагрузках;
- испытания твердости.

К *неразрушающим методам* относятся:

- магнитные (магнитографические методы);
- акустические (ультразвуковая дефектоскопия);
- радиационные (дефектоскопия с помощью рентгеновских и гамма-лучей);

Смысл статистических методов контроля качества заключается в значительном снижении затрат на его проведение.

6.4. Технико-экономическое управление надежностью изделия

Показатели надежности отражают важные качественные особенности изделий. Основные свойства, характеризующие надежность объекта, приведены в гл. 2.

Показатели надежности, по существу, дополняют характеристику технического эффекта, так как определяют длительность и вероятность или полноту появления этого эффекта при эксплуатации изделия. Например, суммарный эффект от изделия у потребителя за средний срок службы $T_{\text{сл}}$ (в годах) при годовом эффекте в случае безотказной работы \mathcal{E}^g составит

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}^g T_{\text{сл}} K_{\text{эф}},$$

где $K_{\text{эф}}$ — коэффициент сохранения эффективности (см. табл. 2.4), учитывающий степень безотказности изделия в эксплуатации.

Таким образом надежность изделия — свойство, безусловно, одно из важнейших для изделия на всех этапах его жизненного цикла (кроме утилизации). С другой стороны, оно имеет четкую технико-экономическую природу. Необходимая надежность конкретного изделия определяется его назначением, и мера надежности — одна из тех характеристик, за которую платит потребитель. В то же время необходимый уровень надежности может быть обеспечен многими техническими приемами, реализация каждого из которых требует определенных затрат. В такой постановке возникает задача технико-экономической оптимизации надежности изделия и затрат на ее обеспечение.

Критерием выбора оптимального решения при определении уровня надежности изделия служит минимум суммы приведенных затрат в комплексе объект — потребитель — смежные звенья:

$$E_n \sum_j K_j + \sum_j C_j \rightarrow \min,$$

где j — число элементов системы, по которым инвестиции K или (и) текущие затраты C различны в зависимости от вариантов выполнения изделия; E_n — внутренний темп окупаемости инвестиций.

Это уравнение равносильно следующему:

$$E_n K_0 + C_0^o + Y_{\text{т.с}} + Y_{\text{п}} + Y_{\text{с.з}} \rightarrow \min,$$

где K_0 — капитальные затраты на повышение надежности (снижение вероятности отказов) системы (изделия); C_0^o — текущие затраты на повышение надежности; $Y_{\text{т.с}}$ — годовой ущерб от отказов изделия у потребителя (ремонт, обслуживание); $Y_{\text{п}}$ — годовой ущерб в основной деятельности потребителя от отказов системы (изделия); $Y_{\text{с.з}}$ — годовой ущерб в смежных звеньях от отказов системы (изделия).

Предположим, таким изделием является электрогенератор, поставляемый фирмой для автомобилей. При его отказах потребителю наносится ущерб не только из-за необходимости дополнительного обслуживания и ремонта электрогенератора, но и из-за снижения качества продукции (напряжение, частота в бортовой электросети автомобиля). Для устранения отказа необходимо иметь резервное оборудование и дополнительные запасы. В свою очередь наносится ущерб в смежных звеньях (у потребителей электроэнергии в системах автомобиля). Им необходимо иметь соответствующие средства защиты от перепада напряжения в сети. Типичная ситуация отображена на рис. 6.7.

Предположим, что в исходном варианте изделия показатели его надежности были на уровне H_1 , а цена потребления изделия (инвестиции в него и текущие расходы) была $З_{п1}$. Изготовителем разработан модифицированный вариант изделия с повышенной надежностью H_{opt} , но цена его потребления $З_{пopt}$ больше $З_{п1}$. В отраженной на рис. 6.7 ситуации потребителю изделия будет выгодно заплатить большую сумму за изделие с повышенной надежностью, так как при этом цена потребления изделия за вычетом суммы ущерба от отказов изделия будет минимальной. Дальнейшее повышение надежности и, следовательно, цены изделия будет невыгодно потребителю. Задача производителя изделия состоит в таком проектировании модифицированного изделия и организации его производства, чтобы обеспечить привлекательную для фирмы-изготовителя норму прибыли. Таким образом, мы еще раз убеждаемся в том, что изготовитель должен системно подойти к ценообразованию на продукцию, изучив экономические характеристики эксплуатации изделия потребителем.

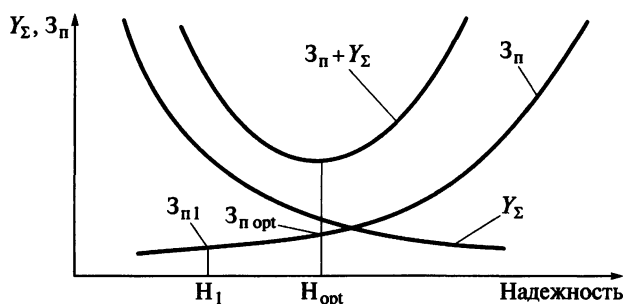


Рис. 6.7. Процесс определения оптимальной надежности:

$Y_Σ$ — суммарный ущерб; $З_n$ — цена потребления объекта; $З_{пopt}$ — оптимальная цена потребления объекта; H_1 — начальные показатели надежности; $З_{п1}$ — начальная цена потребления объекта; H_{opt} — оптимальная надежность

Технически возможны различные методы повышения надежности изделия:

- применение более прочных материалов с более высокими нагрузочными характеристиками, изменение конструктивных решений;

- поэлементное или поканальное резервирование;
- повышение схемной надежности;
- совершенствование технологии изготовления;
- совершенствование системы ремонтов, обслуживания и эксплуатации.

По каждому из этих вариантов технологических решений должны быть рассчитаны затраты, а далее целесообразно построить диаграммы «затраты — надежность», аналогичные приведенным на рис. 6.7. Анализ таких диаграмм позволяет принять решение о методах реализации экономически оптимальной надежности изделия.

6.5. Семь простых статистических методов оценки качества, применяемых в стандартах ИСО 9000

6.5.1. Классификация статистических методов контроля качества

Большую роль в обеспечении качества продукции играют статистические методы.

Целью методов статистического контроля является исключение случайных изменений качества продукции. Такие изменения вызываются конкретными причинами, которые нужно установить и устранить. Статистические методы контроля качества включают в себя:

- статистический приемочный контроль по альтернативному признаку;
- выборочный приемочный контроль по варьирующим характеристикам качества;
- стандарты статистического приемочного контроля;
- систему экономических планов;
- планы непрерывного выборочного контроля;
- методы статистического регулирования технологических процессов.

Следует отметить, что статистический контроль и регулирование качества продукции хорошо известны в нашей стране. В этой области наши ученые имеют несомненный приоритет. Достаточно вспомнить работы А. Н. Колмогорова по несмещенным оценкам

качества принятой продукции на основании результатов выборочного контроля, разработку стандарта приемочного контроля с использованием экономических критериев.

Многие из оценок качества продукции вытекают из самих особенностей сбора информации.

Среди простых статистических методов, названных так ввиду их сравнительной несложности, убедительности и доступности, наибольшее распространение получили семь методов, выделенных в начале 1950-х гг. японскими специалистами под руководством К. Исикавы. В своей совокупности эти методы образуют эффективную систему методов контроля и анализа качества. С их помощью, по свидетельству самого К. Исикавы, может решаться 50...95 % всех проблем, находящихся в поле зрения производственников. Для применения семи простых методов не требуется специального образования (стандартная японская программа обучения этим методам рассчитана на 20 занятий и ориентирована на уровень старшеклассников). О популярности семи простых методов можно судить по тому, что в настоящее время в японских фирмах ими владеют все — от президента до рядового рабочего. В этом отношении данные методы являются средством демократизации технологии управления качеством.

Семь простых методов могут применяться в любой последовательности, в любом сочетании, в различных аналитических ситуациях, их можно рассматривать и как целостную систему, как отдельные инструменты анализа. В каждом конкретном случае предлагается определить состав и структуру рабочего набора методов. Хотя они являются простыми методами, но это отнюдь не значит, что при использовании многих из них нельзя воспользоваться компьютером, чтобы быстрее и без затруднений сделать подсчеты и наглядней представить статистические данные.

Согласно К. Исикаве в семь простых методов входят:

- 1) расслоение данных;
- 2) диаграмма Парето;
- 3) причинно-следственная диаграмма;
- 4) гистограмма;
- 5) диаграмма разброса;
- 6) контрольная карта;
- 7) контрольный листок.

6.5.2. Расслоение данных

Расслоение данных (стратификация) представляет собой группировку данных на страты (группы). При разделении дан-

ных на группы в соответствии с их особенностями группы именуют *слоями (стратами)*, а сам процесс разделения — *расслаиванием (стратификацией)*. Желательно, чтобы различия внутри слоя были как можно меньше, а между слоями — как можно больше.

В результатах измерений всегда есть больший или меньший разброс параметров. Если осуществлять стратификацию по факторам, порождающим этот разброс, легко выявить главную причину его появления, уменьшить его и добиться повышения качества продукции.

Применение различных способов расслаивания зависит от конкретных задач. В производстве часто используется способ, называемый 4М, учитывающий факторы, зависящие от человека (man); машины (machine); материала (material); метода (method).

Таким образом, расслаивание можно осуществить:

- по исполнителям (по полу, стажу работы, квалификации и т.д.);
- машинам и оборудованию (по новому или старому, марке, типу и т.д.);
- материалу (по месту производства, партии, виду, качеству сырья и т.д.);
- способу производства (по температуре, технологическому приему и т.д.).

На практике стратификация используется для расслаивания статистических данных по различным признакам и анализа выявленной при этом разницы в диаграммах Парето, схемах Исикавы, гистограммах, диаграммах рассеивания и т.д.

Рассмотрим пример, когда одноименные объекты производятся на нескольких станках. В этом случае всегда существует некоторая разница в технических данных этих станков, которая является причиной разброса характеристик производимых изделий. Поэтому можно получить ценную информацию о причинах дефектов, если анализировать данные, разделив (расслоив) их по станкам (оборудованию), с помощью которых были изготовлены изделия. Но влияние на разброс показателей качества изделий оказывают и другие факторы: квалификация и внимание исполнителей, качество исходных материалов, методы и условия производства, время изготовления и т.д. Проводя расслоение также и по этим факторам, можно значительно углубить анализ и повысить обоснованность заключения. Рассматривая каждый фактор, по которому проводится расслоение, можно выявить факторы второго порядка, оказывающие влияние на разброс показателей качества, зависящих от того или иного фактора первого порядка. Поэтому часто приходится проводить расслоение еще и по факторам второго, а если окажется необходимым, то и по факторам третьего порядка. Так, в нашем примере факторами расслоения второго порядка могут быть следующие:

- оборудование (тип и форма; конструкция; срок службы; расположение);
- человеческий фактор (заказчик; оператор; рабочий, поставленный на замену; мастер; стаж работы; мужчина или женщина);
- исходные материалы (изготовитель; тип и торговая марка; партия);
- методы (методы операций; условия операций — температура, давление и т. д.; система сдачи продукции);
- время (дата; первая или вторая половина дня; день или ночь; день недели);
- изделие (тип; сорт; качество; партия).

Метод расслоения данных в чистом виде применяется:

- при расчете стоимости изделия, когда требуется оценка прямых и косвенных расходов отдельно по изделиям и по партиям;
- оценке прибыли от продажи изделий отдельно по клиентам и по изделиям;
- оценке качества хранения отдельно по изделиям и по партиям и т. д.

6.5.3. Графическое представление данных

Графическое представление числовых данных позволяет выявить закономерности, которым подчиняется рассматриваемая группа данных. График дает возможность не только оценить состояние на данный момент, но и спрогнозировать более отдаленный результат по тенденции процесса, которую можно в нем обнаружить, а следовательно, наметить меры, которые могут предупредить ухудшение состояния или усилить положительный результат.

Графическое представление данных широко применяется в производственной практике для наглядности и облегчения понимания смысла данных. Различают следующие виды графиков.

График, выраженный ломаной линией, применяемый для выражения изменения каких-либо данных с течением времени, например, изменение с течением времени объема производства или доли дефектных изделий. По оси ординат на таком графике откладывают значение соответствующей величины, а по оси абсцисс — время. Нанесенные на график точки соединяют прямыми отрезками. Эффективность полученной информации возрастет, если при анализе данные расслоить по таким факторам, как продавец, изделие, станок и т. д. Пример такого графика для выражения изменения дефектных деталей по дням приведен на рис. 6.8.

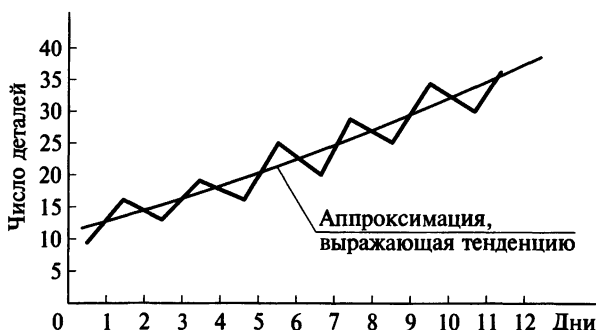


Рис. 6.8. График, выраженный ломаной линией

Круговой и ленточный графики (рис. 6.9 и 6.10) применяют для выражения процентного соотношения рассматриваемых данных.

На рис. 6.10 показано соотношение сумм выручки от продажи по отдельным видам изделий (*A*, *B*, *C*), видна тенденция: изделие *B* перспективно, а *A* и *C* — нет.

Z-образный график (рис. 6.11) применяется для выражения условий достижений данных значений. Например, для оценки общей тенденции при регистрации по месяцам фактических данных (объем сбыта, объем производства и т.д.).

График строится следующим образом:

- откладывают значения параметра (например, объем сбыта) по месяцам (за период одного года) с января по декабрь и соединяют их отрезками прямой (ломаная линия *1* на рис. 6.11);

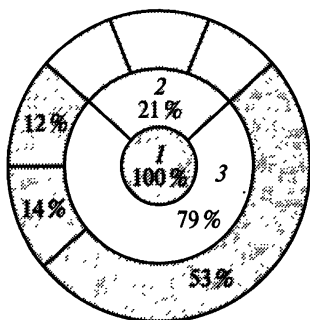


Рис. 6.9. Соотношение составляющих себестоимости производства (круговой график):

1 — себестоимость производства продукции в целом; *2* — косвенные расходы; *3* — прямые расходы

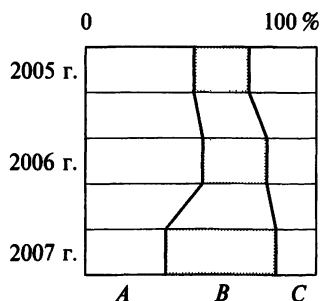


Рис. 6.10. Пример ленточного графика

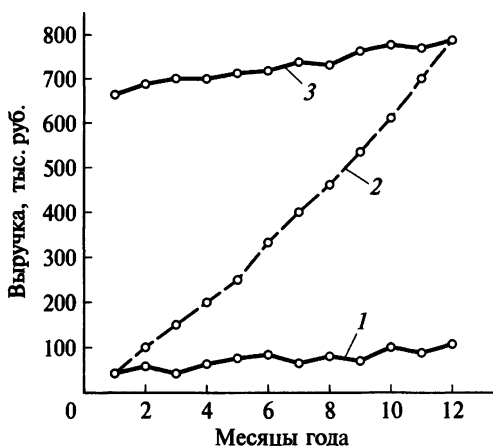


Рис. 6.11. Пример Z-образного графика:

1 — выручка по месяцам; 2 — кумулятивная сумма выручки по месяцам; 3 — измеренная итоговая выручка

- вычисляется кумулятивная сумма за каждый месяц и строится соответствующий график (ломаная линия 2 на рис. 6.11);
- вычисляются итоговые значения (меняющийся итог) и строится соответствующий график. За меняющийся итог в данном случае принимается итог за год, предшествующий данному месяцу (ломаная линия 3 на рис. 6.11).

По меняющемуся итогу можно определить тенденцию изменения за длительный период. Вместо меняющегося итога можно наносить на график планируемые значения и проверять условия их достижения.

Столбчатый график (рис. 6.12) представляет количественную зависимость, выражаемую высотой столбика, таких факторов, как себестоимость изделия от его вида, сумма потерь в результате бра-

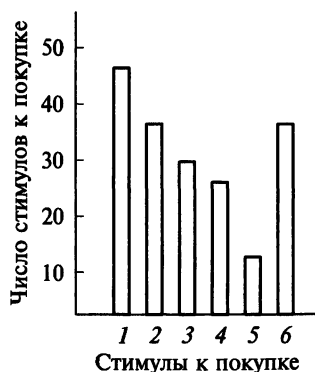


Рис. 6.12. Пример столбчатого графика:

1 — качество; 2 — снижение цены; 3 — гарантийные сроки; 4 — дизайн; 5 — доставка; 6 — прочие

ка от процесса и т.д. Разновидности столбчатого графика — гистограмма и диаграмма Парето. При построении графика по оси ординат откладывают число факторов, влияющих на изучаемый процесс (в данном случае изучение стимулов к покупке изделий). По оси абсцисс — факторы, каждому из которых соответствует высота столбика, зависящая от числа (частоты) проявления данного фактора.

Если упорядочить стимулы к покупке по частоте их проявления и построить кумулятивную сумму, то получим диаграмму Парето.

6.5.4. Диаграмма Парето

Схема, построенная на основе группирования по дискретным признакам, ранжированная в порядке убывания (например, по частоте появления) и показывающая кумулятивную (накопленную) частоту, называется *диаграммой Парето* (рис. 6.13) (В. Парето — итальянский экономист и социолог, использовавший свою диаграмму для анализа богатств Италии).

Приведенная диаграмма построена на основе группирования бракованной продукции по видам брака и расположения в порядке убывания числа единиц бракованной продукции каждого вида. Диаграмму Парето можно использовать очень широко. С ее помощью можно оценить эффективность принятых мер по улучшению качества продукции, построив ее до и после внесения изменений.

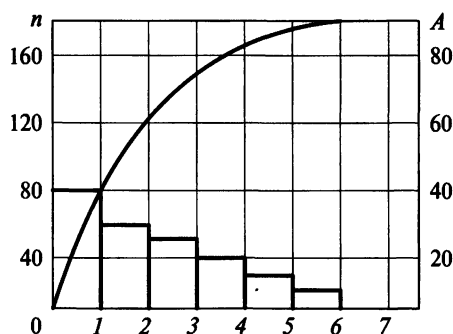


Рис. 6.13. Пример диаграммы Парето:

1 — ошибки в процессе производства; 2 — некачественное сырье; 3 — некачественные орудия труда; 4 — некачественные шаблоны; 5 — некачественные чертежи; 6 — прочее; A — относительная кумулятивная (накопленная) частота; n — число бракованных единиц продукции

6.5.5. Причинно-следственная диаграмма

Качество изделия обеспечивается в процессе его изготовления. Можно сказать, что качество изделия является результатом действия системы факторов и причин, составляющих процесс. Японцы, тяготеющие к алгоритмизации определений для упрощения усвоения основных понятий работниками первой линии производства, определяют процесс как взаимодействие 4М: material (материал) + machine (оборудование) + man (оператор) + method (метод). Зависимость между процессом (4М), представляющим собой систему причинных факторов, и качеством, представляющим собой результат действия этих причинных факторов, можно выразить графически, как показано на рис. 6.14.

Если результат процесса, допустим, качество изделия, оказался неудовлетворительным, следовательно, в системе причин, т.е. в какой-то точке процесса, произошло отклонение от заданных условий. Если причина, вызвавшая отклонение в ходе процесса, всегда может быть обнаружена и устранена, будут производиться изделия только высокого качества. Более того, если постоянно поддерживать заданные условия хода процесса, можно обеспечить формирование высокого качества. Важно также, что полученный результат — показатели качества (точность размеров, степень прочности, степень чистоты и т.д.) — выражается, как показано на рис. 6.14, конкретными данными. Используя эти данные, с помощью статистических методов осуществляют контроль процесса, т.е. проверяют систему причинных факторов. Таким образом, процесс контролируется по факту качества.

Для производства изделий, качество которых удовлетворяло бы запросам потребителей, прежде всего, необходимо наиболее

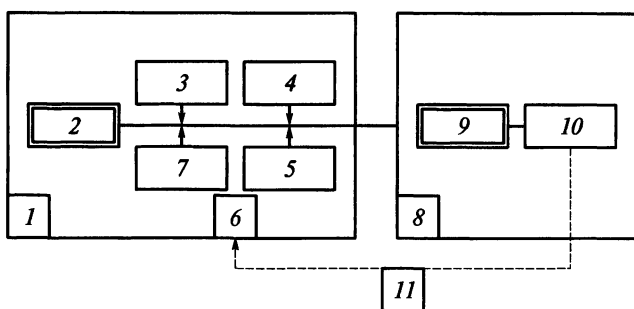


Рис. 6.14. Причинно-следственная диаграмма:

1 — система причинных факторов; 2 — основные факторы производства; 3 — материалы; 4 — оборудование, включая инструменты; 5 — методы операций; 6 — процесс (4М); 7 — оператор; 8 — следствие; 9 — характеристики качества; 10 — данные; 11 — процесс контролируется качеством

важным показателям качества (являющимся следствием) поставить в соответствие различные факторы производства (составляющие систему причинных факторов). Затем на те факторы, которые оказывают отрицательное влияние на результат, необходимо оказать воздействие правильно подобранными мерами и этим ввести процесс в стабильное состояние. Для этого важно хорошо понимать и контролировать зависимость между характеристиками качества (следствием) и параметрами процесса (системой причинных факторов). При этом удобно использовать так называемую причинно-следственную диаграмму (рис. 6.15). Явления (факторы), влияющие на результат, изображаются стрелками, направленными к центральной линии. Для составления такой схемы могут использоваться мнения экспертов и специалистов в данной области.

При поиске причин важно помнить, что характеристики, являющиеся следствием, обязательно испытывают разброс. Поиск среди этих причин факторов, оказывающих особенно большое влияние на разброс характеристик (т.е. на результат), называют *исследованием причин*. На рис. 6.16 показана причинно-следственная диаграмма, отражающая зависимость показателей качества сопряжения цилиндропоршневой группы двигателя от влияющих факторов и условий для случая, когда рассматривается проблема отклонения величины зазора между поршнем и цилиндром от запланированного.

Для составления причинно-следственной диаграммы необходимо подобрать максимальное число факторов, имеющих отношение к характеристике, которая вышла за пределы допустимых значений. При этом для исследования причин явления необходимо привлекать и третьих лиц, не имеющих непосредственного отношения к работе, так как у них может оказаться неожиданный подход к выявлению и анализу причин, которого могут не заметить лица, привычные к данной рабочей обстановке.

Наиболее эффективным считается групповой метод анализа причин, называемый «мозговым штурмом». В этом случае, если проблема возникла в цеху, к группе экспертов присоединяются лица, непосредственно работающие на производственном участке, на котором возник дефект, поскольку люди, ежедневно выполняющие производственные операции на своем рабочем месте, могут сообщить больше ценных фактов, чем кто-либо другой; они хорошо понимают изменения и отклонения в рабочем процессе. Даже просматривая документацию, относящуюся к контролю, или записи рабочих операций, можно пропустить запись (а оператор может сообщить важную для решения проблемы операцию), и если такую информацию упустить, это может обернуться большим ущербом.

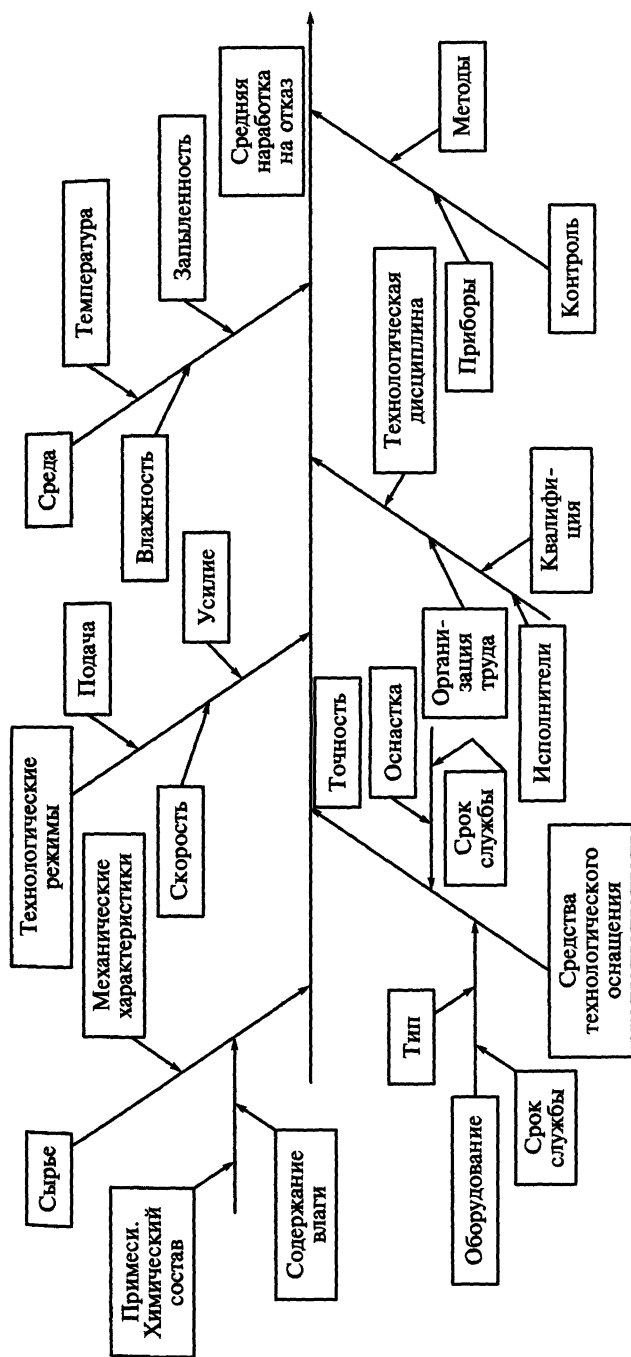


Рис. 6.15. Схема «рыбий скелет» (диаграмма К.Исикавы)

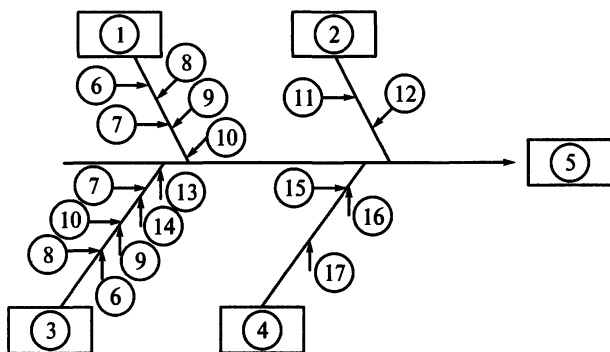


Рис. 6.16. Причинно-следственная диаграмма для анализа зазора между стенкой втулки цилиндра и поршнем:

1 — поверхность трения втулки цилиндра; 2 — измерения; 3 — поверхность трения поршня; 4 — относительное перемещение (трение); 5 — зазор; 6 — толщина масляного слоя; 7 — трение поверхности втулки; 8 — деформация поверхности; 9 — механическая обработка (хонингование); 10 — хромирование; 11 — измерительный прибор; 12 — оператор, производящий измерения; 13 — трение поршня; 14 — нанесение регулярного микрорельефа поверхности; 15 — распределение абразивного материала; 16 — время; 17 — количество абразивного материала

При использовании метода «мозгового штурма» для выявления причин возникновения проблемы основное внимание обращают на следующие моменты:

1) должна быть обеспечена атмосфера, в которой каждый член группы свободно высказывает все, что он думает в отношении причин возникновения проблемы. Вышестоящие по служебной лестнице внимательно выслушивают, не оказывая на выступающего никакого давления;

2) в выступлениях не одобряются бесплодные разговоры, ценятся идеи и сознательное оперирование фактами;

3) лица, относящиеся к руководящему составу, никогда не высказываются первыми, так как после выступления руководителя или ветерана простому рабочему трудно свободно высказать свое мнение;

4) при составлении причинно-следственной диаграммы последней стрелкой среди причин обязательно следует обозначить «и прочие», так как всегда могут остаться неучтенные факторы.

При анализе причин часто приходится пользоваться другими статистическими методами, и прежде всего — методом расслоения.

Причинно-следственная диаграмма используется, когда требуется исследовать и изобразить возможные причины определенной проблемы. Ее применение позволяет выявить и сгруппировать условия и факторы, влияющие на данную проблему.

Порядок составления диаграммы следующий.

Выбирают проблему для решения — «хребет».

Выявляют наиболее существенные факторы и условия, влияющие на проблему — причины первого порядка.

Выявляют совокупность причин, влияющих на существенные факторы и условия (причины второго, третьего и последующих порядков).

Анализируют диаграмму: факторы и условия расставляют по значимости, устанавливают те причины, которые в данный момент поддаются корректировке.

Составляют план дальнейших действий.

6.5.6. Диаграмма разброса

Диаграмму разброса (рассеяния) применяют для выявления зависимости (корреляции) одних показателей от других или для определения степени корреляции между n парами данных для переменных x и y :

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n).$$

Эти данные наносят на график (диаграмму разброса), и для них вычисляют коэффициент корреляции по формулам:

$$r = \frac{\delta_{xy}}{\delta_x \delta_y};$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{n} - \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{n} - \bar{x}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} - \bar{y}^2}};$$

$$\delta_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{n} - \bar{x}^2};$$

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} - \bar{y}^2},$$

где δ_{xy} — ковариация; δ_x и δ_y — стандартные отклонения случайных переменных x и y ; n — размер выборки (число пар данных — x_i и y_i); \bar{x} и \bar{y} — среднеарифметические значения x_i и y_i соответственно.

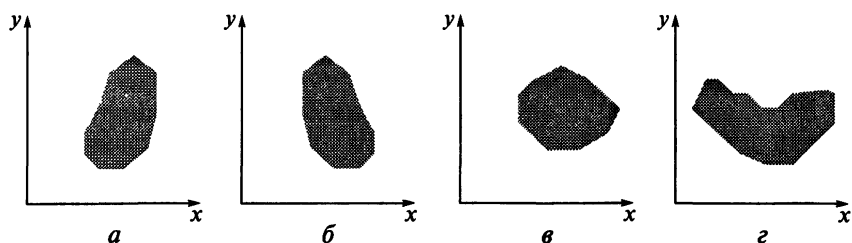


Рис. 6.17. Варианты диаграмм разброса:

a — положительная корреляция; *б* — проявляется отрицательная корреляция; *в* — при росте x y может как расти, так и уменьшаться (говорят об отсутствии корреляции); *г* — очевидная нелинейная зависимость

Рассмотрим различные варианты диаграмм разброса (или полей корреляции), показанные на рис. 6.17:

a — положительная корреляция (с ростом x увеличивается y);

б — проявляется отрицательная корреляция (с ростом x уменьшается y);

в — при росте x y может как расти, так и уменьшаться. В этом случае говорят об отсутствии корреляции. Но это не означает, что между ними нет никакой зависимости, между ними нет лишь линейной зависимости;

г — очевидная нелинейная (экспоненциальная) зависимость.

Коэффициент корреляции всегда принимает значения в интервале $-1 \leq r \leq 1$, т.е. при $r > 0$ — положительная корреляция, при $r = 0$ — нет корреляции, при $r < 0$ — отрицательная корреляция.

Для тех же n пар данных — $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ — можно установить зависимость между x и y . Формула, выражающая эту зависимость, называется *уравнением регрессии* (или *линией регрессии*), и ее представляют в общем виде функцией

$$y = a + bx.$$

Для определения линии регрессии (рис. 6.18) необходимо статистически оценить коэффициент регрессии b и постоянную a . Для этого должны быть выполнены следующие условия:

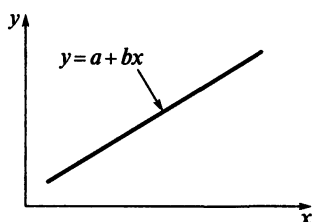


Рис. 6.18. Пример линии регрессии

- 1) линия регрессии должна проходить через точки (x, y) средних значений x и y ;
- 2) сумма квадратов отклонений от линии регрессии значений y по всем точкам должна быть наименьшей;
- 3) для расчета коэффициентов a и b используются формулы

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}; \quad b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}.$$

Уравнением регрессии можно аппроксимировать реальные данные.

6.5.7. Контрольный листок

Контрольный листок (таблица накопленных частот) составляется для построения гистограммы распределения и включает в себя следующие графы (табл. 6.2).

На основании контрольного листка строится гистограмма или, при большом количестве измерений, кривая распределения плотности вероятностей (см. гл. 3).

Гистограмма представляет собой столбчатый график и применяется для наглядного изображения распределения конкретных значений параметра по частоте появления за определенный период времени. При нанесении на график допустимых значений параметра можно определить, как часто этот параметр попадает в допустимый диапазон или выходит за его предел.

При исследовании гистограммы можно выяснить, в удовлетворительном ли состоянии находятся партия изделий и технологический процесс, для чего рассматривают следующие вопросы:

- Какова ширина распределения по отношению к ширине допуска?
- Каков центр распределения по отношению к центру поля допуска?
- Какова форма распределения?

Таблица 6.2

Накопленные частоты

Номер интервала	Измеренные значения	Частота	Накопленная частота	Накопленная относительная частота

В результате исследования диаграммы возможно получение следующих результатов. Итак, если:

- форма распределения симметрична, то имеется запас по полю допуска, центр распределения и центр поля допуска совпадают — качество партии в удовлетворительном состоянии;
- центр распределения смещен вправо, т.е. опасение, что среди изделий (в остальной части партии) могут находиться дефектные изделия, выходящие за верхний предел допуска. Проверяют, нет ли систематической ошибки в измерительных приборах. Если нет, то продолжают выпускать продукцию, отрегулировав операцию и сместив размеры так, чтобы центр распределения и центр поля допуска совпадали;
- центр распределения расположен правильно, однако ширина распределения совпадает с шириной поля допуска. Есть опасения, что при рассмотрении всей партии появятся дефектные изделия. Необходимо исследовать точность оборудования, условия обработки и т.д. либо расширить поле допуска;
- центр распределения смещен, что свидетельствует о присутствии дефектных изделий. Необходимо путем регулировки переместить центр распределения в центр поля допуска либо сузить ширину распределения, либо пересмотреть допуск;
- в распределении имеется 2 пика, хотя образцы взяты из одной партии. Объясняется это либо тем, что сырье было двух разных сортов, либо в процессе работы была изменена настройка станка, либо в одну партию соединили изделия, обработанные на двух разных станках. В этом случае следует производить обследование послойно;
- и ширина, и центр распределения — в норме, однако незначительная часть изделий выходит за верхний предел допуска и, отделяясь, образует обособленный островок. Возможно, эти изделия — часть дефектных, которые вследствие небрежности были перемешаны с доброкачественными в общем потоке технологического процесса. Необходимо выяснить причину и устранить ее.

6.5.8. Контрольная карта

Одним из способов достижения удовлетворительного качества и поддержания его на этом уровне является применение контрольных карт. Для управления качеством технологического процесса необходимо иметь возможность контролировать те моменты, когда выпускаемая продукция отклоняется от заданных техническими условиями допусков. Рассмотрим простой пример. Проследим за работой токарного станка на авторемонтном предприятии в течение определенного времени и будем измерять диаметр детали, изготавливаемой на нем (за смену, час). По полученным



Рис. 6.19. Пример контрольной карты

результатам построим график и получим простейшую контрольную карту (рис. 6.19).

В точке 6 произошла разладка технологического процесса, необходимо его регулирование. Положение верхней и нижней контрольных границ (ВКГ и НКГ) определяется аналитически либо по специальным таблицам и зависит от объема выборки. При достаточно большом объеме выборки пределы ВКГ и НКГ определяют по формулам:

$$\text{ВКГ} = +3\delta;$$

$$\text{НКГ} = -3\delta;$$

$$\delta = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

где δ — стандартные отклонения случайной переменной x ; n — объем выборки; \bar{x} — среднее арифметическое значение x_i .

Верхняя и нижняя контрольные границы служат для предупреждения разладки процесса, когда изделия еще соответствуют техническим требованиям.

Контрольные карты применяют, когда требуется установить характер неисправностей и дать оценку стабильности процесса; когда необходимо установить, нуждается ли процесс в регулировании или его необходимо оставить таким, каков он есть. Контрольной картой можно также подтвердить улучшение процесса.

Контрольная карта является средством распознавания отклонений из-за неслучайных или особых причин от вероятных изменений, присущих процессу. Вероятные изменения редко повторяются в прогнозируемых пределах. Отклонения из-за неслучайных или особых причин сигнализируют о том, что некоторые факторы, влияющие на процесс, необходимо идентифицировать, расследовать и поставить под контроль.

Контрольные карты основываются на математической статистике и используют рабочие данные для установления пределов, в рамках которых будут ожидать предстоящие исследования, если процесс останется неэффективным из-за случайных или особых причин.

Информация о контрольных картах содержится и в международных стандартах ИСО 7870, ИСО 8258.

Наибольшее распространение получили контрольные карты среднего значения \bar{X} и контрольные карты размаха R , которые используются совместно или раздельно. Контролироваться должны естественные колебания между пределами контроля. Нужно убедиться, что выбран правильный тип контрольной карты для определенного типа данных. Данные должны быть взяты точно в той последовательности, в какой собраны, иначе они теряют смысл. Не следует вносить изменения в процесс в период сбора данных. Данные должны отражать естественный ход процесса.

Контрольная карта может указать на наличие потенциальных проблем до того, как начнется выпуск дефектной продукции.

Принято говорить, что процесс вышел из-под контроля, если одна или более точек вышли за пределы контроля.

Существуют два основных типа контрольных карт: для качественных (годен — негоден) и для количественных признаков. Для качественных признаков возможны четыре вида контрольных карт: число дефектов на единицу продукции; число дефектов в выборке; доля дефектных изделий в выборке; число дефектных изделий в выборке. При этом в первом и третьем случаях объем выборки будет переменным, а во втором и четвертом — постоянным.

Таким образом, целями применения контрольных карт могут быть:

- выявление неуправляемого процесса;
- контроль за управляемым процессом;
- оценивание возможностей процесса.

Обычно подлежат изучению следующие переменные величины (параметры процесса) или характеристики:

- известная важная или важнейшая;
- предположительная ненадежная;
- по которой нужно получить информацию о возможностях процесса;
- эксплуатационная, имеющая значение при маркетинге.

При этом не следует контролировать все величины одновременно. Контрольные карты стоят денег, поэтому нужно использовать их разумно: тщательно выбирать характеристики; прекращать работу с картами при достижении цели: продолжать вести карты только тогда, когда процессы и технические требования сдерживают друг друга.

Необходимо иметь в виду, что процесс может быть в состоянии статистического регулирования и давать 100 % брака. И на-

оборот, может быть неуправляемым и давать продукцию, на 100 % отвечающую техническим требованиям.

Контрольные карты позволяют проводить анализ возможностей процесса. Возможности процесса — это способность функционировать должным образом. Как правило, под возможностями процесса понимают способность удовлетворять техническим требованиям.

Существуют следующие виды контрольных карт:

1) контрольные карты для регулирования по количественным признакам (измеренные величины выражаются количественными значениями):

а) контрольная карта $\bar{x} - R$, состоящая из контрольной карты \bar{x} , отражающей контроль за изменением среднего арифметического \bar{x} , и контрольной карты R , служащей для контроля изменений рассеивания значений показателей качества. Применяется при измерении таких показателей, как длина, масса, диаметр, время, предел прочности при растяжении, шероховатость, прибыль и т.д.;

б) контрольная карта $\tilde{x} - R$, состоящая из контрольной карты \tilde{x} , осуществляющей контроль за изменением значения медианы \tilde{x} , и контрольной карты R . Применяется в тех же случаях, что и предыдущая карта, однако она более проста, поэтому более пригодна для заполнения на рабочем месте;

2) контрольные карты для регулирования по качественным признакам:

а) контрольная карта p (для доли дефектных изделий) или процента брака, применяемая для контроля и регулирования технологического процесса после проверки небольшой партии изделий и разделения их на доброкачественные и дефектные, т.е. определения их по качественным признакам. Долю дефектных изделий получают путем деления числа обнаруженных дефектных изделий на число проверенных изделий. Может применяться также для определения интенсивности выпуска продукции, процента неявки на работу и т.д.;

б) контрольная карта pn (количество брака), применяемая в случаях, когда контролируемым параметром является число дефектных изделий при постоянном объеме выборки n . Практически совпадает с картой p ;

в) контрольная карта c (число дефектов на одно изделие), используемая, когда контролируется число дефектов, обнаруживаемых среди постоянных объемов продукции (автомобили — 1 или 5 транспортных единиц, листовая сталь — 1 или 10 листов);

г) контрольная карта n (число дефектов на единицу площади), используемая, когда площадь, длина, масса, объем, сорт непостоянны и обращаться с выборкой как с постоянным объемом невозможно.

При обнаружении дефектных изделий целесообразно прикреплять к ним разные ярлыки: для дефектных изделий, обнаруженных оператором (тип *A*), и для дефектных изделий, обнаруженных контролером (тип *B*). Например, в случае *A* — красные буквы по белому полю, в случае *B* — черные буквы по белому полю.

На ярлыке указывают номер детали, наименование изделия, технологический процесс, место работы, год, месяц и число, сущность дефекта, число отказов, причину возникновения дефектности, принятые меры воздействия.

В зависимости от целей и задач анализа качества продукции, а также возможностей получения необходимых для его осуществления данных аналитические методы его проведения существенно различаются. Влияет на это и этап жизненного цикла продукции, охватываемый деятельностью предприятия.

На этапах проектирования, технологического планирования, подготовки и освоения производства целесообразно применение функционально-стоимостного анализа (ФСА), представляющего собой метод системного исследования функций отдельного изделия или технологического, производственного, хозяйственного процессов, структуры, ориентированный на повышение эффективности использования ресурсов путем оптимизации соотношения между потребительскими свойствами объекта и затратами на его разработку, производство и эксплуатацию.

Основными принципами применения ФСА являются:

- функциональный подход к объекту исследования;
- системный подход к анализу объекта и выполняемых им функций;
- исследование функций объекта и их материальных носителей на всех стадиях жизненного цикла изделия;
- соответствие качества и полезности функций продукции затратам на них;
- коллективное творчество.

Выполняемые изделием и его составляющими функции можно сгруппировать по ряду признаков. По области проявления функции подразделяются на внешние и внутренние. *Внешние* — это функции, выполняемые объектом при его взаимодействии с внешней средой. *Внутренние* — функции, которые выполняют какие-либо элементы объекта, и их связи в границах объекта.

По роли в удовлетворении потребностей среди внешних функций различают главные и второстепенные. *Главная* функция отражает главную цель создания объекта, а *второстепенная* — побочную.

По роли в рабочем процессе внутренние функции можно подразделить на основные и вспомогательные. *Основная* функция подчинена главной и обуславливает работоспособность объекта. С помощью *вспомогательных* реализуются главные, второстепенные и основные функции.

По характеру проявления все перечисленные функции делятся на номинальные, потенциальные и действительные. *Номинальные* задаются при формировании, создании объекта и обязательны для выполнения. *Потенциальные* отражают возможность выполнения объектом каких-либо функций при изменении условий его эксплуатации. *Действительные* — это фактически выполняемые объектом функции.

Все функции объекта могут быть полезными и бесполезными, а последние нейтральными и вредными.

Цель функционально-стоимостного анализа заключается в развитии полезных функций объекта при оптимальном соотношении между их значимостью для потребителя и затратами на их осуществление, т. е. в выборе наиболее благоприятного для потребителя и производителя, если речь идет о производстве продукции, варианта решения задачи о качестве продукции и ее стоимости. Математически цель ФСА можно записать следующим образом:

$$\frac{ПС}{З} = \max,$$

где ПС — потребительная стоимость анализируемого объекта; З — издержки на достижение необходимых потребительных свойств.

Контрольные вопросы

1. Как влияет длительность всех стадий жизненного цикла автомобиля на его экономическую эффективность?
2. Какие показатели качества входят в комплексную систему обеспечения качества изделия?
3. Поясните жизненный цикл («петля качества») продукции по стандарту ИСО 9004.
4. Что понимают под уровнем качества изделия?
5. В течение какого срока действителен сертификат регистрации ИСО 9000?
6. Какое место занимает контроль качества в управлении качеством продукции?
7. В чем суть разрушающих и неразрушающих методов контроля качества?
8. Перечислите семь простых статистических методов оценки качества, применяемых в стандартах ИСО 9000.

Физическая сущность процессов изменения надежности конструктивных элементов автомобилей при их эксплуатации

7.1. Причины потери работоспособности и виды повреждений элементов машин

Причины отказа — это явления, процессы, события и состояния, обусловившие возникновение отказа объекта. Исследование причин отказа невозможно без привлечения физической теории надежности и ряда инженерных дисциплин. Действительно к явлениям, вызывающим отказы систем и элементов автомобилей, могут быть отнесены износ, пластическая деформация, разупрочнение поверхностей и т. п. Отдельные явления приводят к появлению процессов и событий, вызывающих отказы.

К процессам могут быть отнесены изнашивание, рост трещин, коррозия, старение материалов и т. п.

Событиями, приводящими к отказам, могут быть появление перегрузок, изменение напряжения в сети, попадание абразива в масло, схватывание сопрягаемых поверхностей, нарушение установленных режимов и правил эксплуатации и т. п.

Состояниями объектов, являющимися причиной отказов, могут быть:

- отсутствие защиты от попадания пыли и влаги;
- наличие остаточных напряжений или концентраторов напряжений;
- макро- и микротрещины, дефекты сборки, наличие рисков и т. п.

При установлении причин отказа необходимо устанавливать явления, процессы, события и состояния, приводящие к их появлению, а также возможное сочетание факторов.

Классификация отказов приведена в гл. 2.

В сфере производства отказы возникают в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, выполнявшегося на ремонтном предприятии. К наиболее типичным дефектам технологии следует отнести:

- дефекты из-за неправильного состава материала (включения, примеси, повышающие хрупкость и т. д.);

- дефекты при плавке и изготовлении заготовок (пористость, усадочные раковины, неметаллические включения, расслоения);

- ошибки при механической обработке (ожоги, задиры, заусенцы, трещины, прорезы, избыточная локальная пластическая деформация);

- дефекты сварки (трещины, остаточные напряжения, углубления, недостаточная глубина шва, термическое повреждение отдельных участков основного материала и т.д.);

- дефекты термообработки (перегрев, закалочные трещины, обезуглероживание, избыточные остаточные аустениты и др.);

- дефекты при обработке поверхностей (химическая диффузия, водородное охрупчивание, снижение механических свойств материала и др.);

- дефекты сборки (повреждения поверхностей, задиры, внесение абразива, несоответствие размеров деталей и др.).

К эксплуатационным относятся отказы, возникшие в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации объекта (неправильное техническое обслуживание, низкое качество запасных частей, появление перегрузок, использование не по назначению и т.д.).

На основе физической теории надежности создаются методы расчета надежности деталей машин, методы ускоренных испытаний, устанавливаются режимы упрочнения поверхностей деталей машин. Интеграция теории надежности с названными физикотехническими дисциплинами привела к появлению таких направлений в теории надежности, как прочностная надежность, трибологическая, коррозионная надежность. В этих направлениях решаются задачи расчета, испытаний и обеспечения надежности на основе методов теории прочности, трибологии и коррозии металлов, а также в условиях воздействия на изделия соответственно механических нагрузок, агрессивных сред, трения и изнашивания, радиации.

При исследовании причин отказов в первую очередь должен быть проведен анализ режимов и условий эксплуатации и действующих нагрузок. Нагрузки, воздействующие на технические устройства, могут быть подразделены на две группы:

- 1) нагрузки, обусловленные внешними воздействующими факторами (ВВФ);

- 2) нагрузки, обусловленные функционированием самого изделия.

Для деталей машин наиболее типичны механические и тепловые нагрузки, для элементов электроприборов — электрические и тепловые. Укрупненно виды нагрузок подразделяют на механические, электрические, акустические, тепловые, гидравлические (пневматические), радиационные, электромагнитные, магнитные, биологические, климатические и химические. Детали и узлы ма-

шин и приборов одновременно подвергаются влиянию, как правило, нескольких видов нагрузок. Действие различных видов нагрузок взаимозависимо. В свою очередь, сравнительно большая тепловая инерция материалов элементов механических систем приводит к неравномерному распределению температуры по отдельным участкам деталей, что является причиной неравномерной деформации и, как следствие этого, появления механических нагрузок.

Процесс действия нагрузок на детали машин является основной причиной их отказов, поэтому анализ причин отказов невозможен без учета вида воздействующих нагрузок, длительности воздействия и закономерностей изменения нагрузок во времени.

Если на изделие действует одна или несколько нагрузок, то говорят, что оно нагружено, т.е. функционирует под нагрузкой. Таким образом, *нагружение* — это процесс воздействия нагрузок на изделие.

Нагруженность деталей и узлов — состояние деталей и узлов, обусловленное внешними воздействиями и условиями функционирования.

Анализ причин отказов проводится с целью обоснованной разработки мероприятия по их предотвращению как в серийно изготавливаемых изделиях, так и во вновь разрабатываемых видах техники с конструктивно-технологическим подобием.

7.2. Физико-химические процессы разрушения материалов

7.2.1. Классификация физико-химических процессов

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

Материалы большинства изделий технических объектов представляют собой кристаллические твердые тела.

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

Наиболее типичными являются следующие виды дефектов:

- точечные дефекты (вакансии, межузельные атомы и др.);
- одномерные (линейные) дефекты (дислокации);
- двумерные поверхностные дефекты (границы зерен и двойников, дефекты упаковки и др.);
- трехмерные (объемные) дефекты (пустоты, включения и др.).

Для изделий автомобильной промышленности наиболее распространенным типом точечного дефекта являются *вакансии*, которые оказывают решающее влияние на процессы ползучести, обезуглероживания, графитизации и других процессов, связанных с переносом атомов в материалах.

При анализе причин отказов важно различать физическую и химическую адсорбции. При *физической адсорбции* частицы адсорбируемого вещества сохраняют свои свойства, при *химической* — адсорбирующее вещество вступает в химическую реакцию с адсорбируемым, образуя новое вещество — адсорбат.

Сорбционные процессы могут ускорять процессы износа, коррозии и других видов разрушений, снижая ресурс элементов изделий.

7.2.2. Процессы механического разрушения твердых тел

Современная теория физики твердого тела рассматривает процесс разрушения материала как постепенный кинетический термоактивационный процесс, развивающийся в механически напряженном материале с момента приложения нагрузки любой величины.

Скорость процессов механического разрушения деталей зависит от структуры и свойств материала, геометрической формы и состояния поверхности, от напряжения, вызываемого нагрузкой и температурой. В настоящее время экспериментально получена зависимость между ресурсом материала, напряжением и температурой:

$$t_p = \tau_0 e^{\frac{W_0 - \sigma}{RT}}, \quad (7.1)$$

где t_p — наработка до отказа; τ_0 — параметр, совпадающий по значению с периодом собственных тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке твердого тела ($\tau_0 = 10^{-12} \dots 10^{-14}$ с), постоянный для всех материалов и не зависящий от обработки материала и условий нагрузки; W_0 — начальная энергия активации процесса разрушения при $\sigma = 0$, постоянная для данного материала в широкой области температур и не зависящая от обработки

материала, $W_0 - \gamma\sigma$ — энергия активации разрушения ($W_{a.p}$); γ — характеристика чувствительности материала к напряжению; R — универсальная газовая постоянная; T — температура.

Из формулы (7.1) видно, что при уменьшении температуры до нуля время разрушения увеличивается до бесконечности. Это означает, что разрушение при нагрузках ниже критической температуры не может происходить в отсутствие теплового движения атомов.

У металлов разрушение определяется в основном двумя процессами: разрывом межатомных связей за счет тепловых флуктуаций и направленной диффузией вакансий к трещинам.

Таким образом, с увеличением температуры интенсивность отказов экспоненциально возрастает. На практике отказ элемента может определяться многими термически активируемыми процессами.

7.2.3. Старение материалов

При эксплуатации автомобилей происходит старение деталей — процесс постепенного и непрерывного изменения физико-механических свойств материалов деталей машин, ведущий к снижению их работоспособности; коррозионные процессы, происходящие в материалах деталей под воздействием химически активных составляющих среды (воды, составляющих горючего и смазочных материалов, отработавших газов и др.); процессы, сопровождающие трение и изнашивание деталей машин, и др.

Старением материалов называются процессы изменения их физико-механических свойств во времени в условиях длительного хранения или эксплуатации. Обычно старение обусловлено недостаточно стабильным (неравновесным) состоянием материала и постепенным его переходом в стабильное (равновесное) состояние.

Старение материала может приводить как к улучшению, так и к ухудшению отдельных свойств материалов. Во многих случаях технологическими процессами предусматриваются операции искусственного старения материалов с целью улучшения их свойств.

К старению металлов и сплавов следует относить все процессы изменения во времени их свойств, связанные с превращениями металлов и сплавов в твердом состоянии.

Эти процессы можно разделить на две группы:

- превращения, связанные только с изменением кристаллической структуры, протекающие без изменения химического состава образующихся при превращении фаз;
- превращения, сопровождающиеся образованием фаз с измененным химическим составом.

7.3. Отказы по параметрам прочности

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

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

Отказом по параметрам прочности могут быть события, связанные с разрушением изделия или с получением недопустимой величины деформаций. Показателем, характеризующим наработку до наступления такого вида событий, может служить, например, средняя наработка до отказа. Предельным состоянием изделий по критериям прочности могут быть события, связанные с накоплением определенного числа циклов нагружений, с недопустимым изменением параметров прочности, с накоплением определенной величины пластических деформаций и т.д.

Для характеристики надежности по параметрам прочности нередко используется термин **прочностная надежность**. Под этим термином понимается свойство машин, конструкций и их элементов сохранять во времени работоспособное состояние при воздействии на него внешних нагрузок. Показатели прочностной надежности будут иметь физический смысл, если одновременно с их заданием и определением будут указаны критерии отказов и предельных состояний.

Отказы по параметрам прочности чаще всего связаны с изломом деталей машин или элементов конструкций или их деформацией. **Изломы** подразделяются на две большие группы: хрупкие и вязкие.

Под **хрупким** изломом понимают излом без признаков макроскопических пластических деформаций. Такой вид излома возникает при разрушении в условно упругой зоне деформирования. Однако при этом следует иметь в виду, что у вершины распространяющейся хрупкой трещины в металлах возникает локальная пластическая деформация. Хрупкое разрушение распространяется с большой скоростью, сопоставимой со скоростью распространения звука в данном материале. Разрушение происходит вдоль оп-

ределенных кристаллографических плоскостей зерна (плоскости скола), вызывая межкристаллитное разрушение. Хрупкое разрушение происходит в тех случаях, когда появляются факторы, препятствующие пластическим деформациям. Это может иметь место при изменении под воздействием эксплуатационных нагрузок свойств материала (выделение хрупких карбидов, накопление усталостных повреждений, охрупчивание границ зерен и т.п.).

Пластическому, или вязкому, излому предшествует макроскопическая пластическая деформация, вызванная сдвигом в плоскостях скольжения или плоскостях скола и по границам зерен.

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

В зависимости от приложенных нагрузок изломы подразделяются на динамические, усталостные, изломы от превышения предела прочности, изломы при изгибающих и скручивающих нагрузках.

К *динамическим* относятся изломы, происходящие внезапно под действием перегрузок или удара. Среди динамических изломов следует различать хрупкие изломы с крупнозернистой поверхностью у практически недеформируемых материалов и гладкие изломы от сдвига, проходящие по направлению максимального касательного напряжения и связанные со значительной пластической деформацией.

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

Если при анализе излома будет неправильно определена его причина, то проводимые мероприятия по исключению возможности появления такого разрушения у других подобных деталей могут не только не дать положительного эффекта, но привести даже к снижению надежности.

При работе изделий в условиях высоких температур важной характеристикой прочностной надежности является ресурс по ползучести.

Ползучесть — это явление, заключающееся в том, что металл, нагруженный при высокой температуре, непрерывно деформируется под воздействием постоянных во времени напряжений.

В результате воздействия ползучести происходит ослабление сопротивляемости материала воздействию нагрузок. При этом напряжения, вызывающие разрушения, могут быть значительно меньше временного сопротивления при данной температуре.

При многократно повторяющихся температурных напряжениях наблюдается **термическая (малоцикловая) усталость** металла.

Ползучесть и термическая усталость, как правило, взаимодействуют друг с другом и оба вида этих разрушений происходят одновременно.

7.4. Трибологические отказы

Трибология — это наука, изучающая процессы изнашивания с учетом свойств материалов и смазки. Под трибологической надежностью понимается свойство изделий сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции при его функционировании в условиях трения и изнашивания. Отказами объектов по трибологическим критериям являются события, связанные с достижением износа объекта нормативной величины, с нарушением условий смазки, с явлениями схватывания, задира, с наступлением периода интенсивного изнашивания, с превышением (уменьшением) заданного предельного значения коэффициента трения и т. п. Показатели, характеризующие трибологическую надежность, в большинстве случаев могут быть выражены через скорость и интенсивность изнашивания.

Основной причиной нарушения работоспособности и возникновения отказов машин являются изменения, происходящие в материалах деталей вследствие трения и изнашивания.

Явления трения и изнашивания сопровождаются рядом явлений и процессов, приводящих к отказам и происходящих на поверхностях трения. К числу основных процессов и явлений относятся:

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

Статистические данные показывают, что отказы из-за изнашивания поверхностей достигают 50...80 % всех отказов, возникающих в процессе эксплуатации машин.

Изнашивание — это процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопление его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

В результате процесса изнашивания происходит износ материала, проявляющийся в виде отделения или остаточной деформации материала.

Износ — результат изнашивания, определяемый в установленных единицах (например, в микрометрах).

Изнашивание поверхностей деталей возникает под действием трения и зависит от материалов деталей, качества обработки их поверхностей, нагрузки, скорости относительного перемещения поверхностей, их температур и, пожалуй, самое важное — качества и количества смазочного материала.

Под **трением** понимается явление сопротивления относительному перемещению, возникающего между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним. Количественно трение может оцениваться:

- силой трения (сила сопротивлений относительному перемещению двух тел трения);
- коэффициентом трения (отношение силы трения к нормальной составляющей внешних сил, действующих на поверхности тела).

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

В зависимости от количества и свойств смазки между трущимися поверхностями различают трение сухое, граничное (полусухое, полужидкостное) и жидкостное.

Сила при сухом трении выражается законом Амонтона — Кулона:

$$F = fN, \quad (7.2)$$

где f — коэффициент трения скольжения; N — нормальная сила.

Коэффициент f зависит от величины микро- и макронеровностей поверхностей, скорости относительного их скольжения, физических свойств трущихся материалов и температуры. Величина коэффициента трения f «чистых» металлов для металлических пар лежит в пределах 0,06...0,20.

При граничном (полусухом, полужидкостном) трении молекулы масла адсорбируются кристаллической решеткой металла, образуя несколько слоев упорядоченных молекул, толщиной около 0,1 мкм. Это позволяет несколько снизить пластические дефор-

мации металлов и уменьшить таким образом крайне негативные последствия сухого трения.

При жидкостном трении контакт поверхностей заменяется трением слоев смазки. Коэффициент трения выражается соотношением:

$$f = \frac{A\mu v}{N}, \quad (7.3)$$

где A — коэффициент пропорциональности; μ — коэффициент динамической вязкости; v — скорость относительного перемещения; N — нормальная сила.

При жидкостном трении контакта трущихся поверхностей вообще не должно быть, равно как и их изнашивания. Согласно гидростатической теории смазки даже без непосредственного контакта деталей незначительный износ их поверхностей все же наблюдается в результате физико-химических, в том числе и электростатических процессов, возникающих между трущимися поверхностями, и контакта их со смазочным материалом.

При анализе технических систем необходимо различать следующие виды трения по наличию и характеру движения:

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

По характеру относительного движения трение подразделяется:

- на трение качения;
- трение скольжения.

К трению качения относится трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению. Трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по величине и направлению или по величине или направлению, называется трением скольжения.

В результате процесса изнашивания происходит износ поверхностей. Значение износа, при котором изделие сохраняет работоспособность, называется допустимым износом. При определенной величине износа, называемого предельным, наступает отказ или предельное состояние изделия, после которого использование изделия должно быть прекращено или становится невозможным. Отказы из-за износа относятся к категории трибологических отказов. Нарботка до отказа из-за износа определяется по величине скорости или интенсивности изнашивания. *Скорость изнашивания* — это отношение износа к интервалу времени, в течение которого он возник; обычно различают мгновенную (в определенный момент времени) и среднюю скорость изнашивания (за определенный интервал времени). *Интенсивность изнашивания*

определяется как отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполненной работы.

7.5. Виды изнашивания деталей автомобиля

Виды изнашивания деталей автомобиля следует квалифицировать согласно рис. 7.1.

Механическое изнашивание происходит в результате механических воздействий.

Абразивное изнашивание проявляется вследствие попадания между трущимися поверхностями так называемых абразивных частиц. Эти частицы имеют бо́льшую твердость, чем твердость поверхности трения, пластически деформируют поверхность трения, образуя на них риски и царапины. Абразивные частицы попадают между поверхностями трения деталей вместе с атмосферным воздухом, топливом, смазочным материалом, техническими жидкостями или образуются из продуктов изнашивания. Абразивное изнашивание в автомобиле является доминирующим и происходит, например, в поршневых узлах, парах скольжения, шкворневых соединениях и т.д.

Изнашивание при пластическом деформировании сопровождается изменением макрогеометрических размеров детали без потери массы под действием передаваемой нагрузки и под влиянием сил

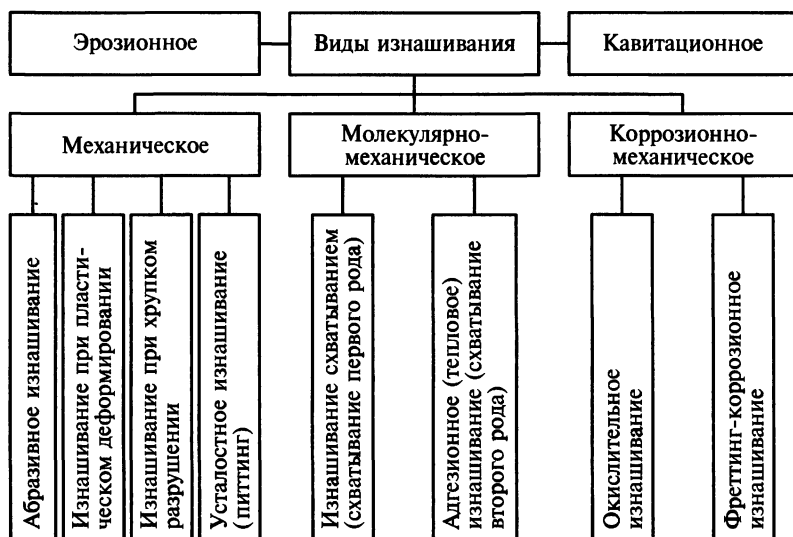


Рис. 7.1. Виды изнашивания деталей автомобилей

трения, что сопровождается перемещением металлов в сторону скольжения. По пластическому механизму происходит изнашивание резьбовых соединений, вкладышей подшипников скольжения, различных втулок и т.д.

Изнашивание при хрупком разрушении заключается в том, что поверхностный слой трущихся деталей в результате трения и деформирования (чаще многоциклового) подвергается интенсивному наклепу, становится хрупким и разрушается. Этот вид изнашивания первоначально происходит по механизму предыдущего вида изнашивания, но характерен более высокими нагрузками в контакте трения, что и приводит к образованию наклепа и последующему разрушению поверхностей деталей уже с потерей массы. Самый характерный пример — изнашивание беговых дорожек подшипников качения.

Усталостное изнашивание (питтинг) заключается в образовании на поверхности трения усталостных трещин под действием повторных знакопеременных сил. Впоследствии микротрещины растут и выкрашиваются. При этом росту трещин и выкрашиванию в них материалов способствует смазка, работающая по механизму расклинивания. Этот вид изнашивания наиболее характерен для трущихся поверхностей газораспределительного механизма (ГРМ), зубчатых передач и т.д.

Молекулярно-механическое изнашивание происходит в результате молекулярного взаимодействия трущихся поверхностей. Часто наблюдается при недостатке смазки, больших нагрузках, температурах и скоростях скольжения.

Изнашивание схватыванием (схватывание первого рода) заключается в микросваривании участков трущихся поверхностей; после последующего их взаимного перемещения возникшая связь разрушается.

Адгезионное (тепловое) изнашивание (схватывание второго рода) проявляется следующим образом. Первые этапы идентичны предыдущему виду изнашивания, а далее схватывание контактирующих поверхностей разъединяется не в месте сваривания, а происходит с переносом части одного металла на поверхность другого (адгезия металла). При более жестких условиях трения трущиеся сварившиеся металлы вообще могут не разъединиться, что приводит к заклиниванию или полной потере подвижности контактирующих деталей. Результаты этого вида изнашивания легко наблюдать, например, на шейках коленчатого вала, зеркале цилиндра и т.д. Часто заклинивают поршни в двигателях, коленчатые валы и т.п.

Коррозионно-механическое изнашивание — механическое изнашивание, усиленное явлениями коррозии.

Окислительное изнашивание происходит под действием химически агрессивных сред (вода, неорганические и органические

кислоты), в результате чего на трущихся поверхностях образуются оксиды металлов. Суть коррозионных явлений в автомобилях подробно рассмотрена в подразд. 7.6. Износостойкость оксидов существенно ниже износостойкости основных металлов. После выработки оксидов металлы оголяются и опять окисляются. В результате общий износ поверхностей деталей интенсифицируется. Данный вид изнашивания наблюдается на всех трущихся поверхностях деталей автомобиля, контактирующих с агрессивными средами — детали цилиндропоршневой группы двигателя, шарниры систем автомобиля и т.д.

Фреттинг-коррозионное изнашивание характерно для поверхностей трущихся деталей, подверженных, помимо окисления, вибрациям, т.е. колебаниям с высокой частотой и малой амплитудой. Частицы оксидных пленок при этом не только истираются, но и отделяются (осыпаются) с поверхностей. Таким образом увеличивается износ металлов. Продукты окисления к тому же являются абразивными частицами, интенсифицирующими абразивное изнашивание. Фреттинг-коррозия наблюдается в соединениях больших корпусных деталей, например в местах прилегания фланцев блока цилиндров и картера сцепления. Другой типичный пример — поверхности контакта вкладышей шеек коленчатого вала и постелей в картере двигателя.

Эрозионное изнашивание заключается в вырывании частиц материалов деталей с поверхностей, омываемых газами с высокой температурой и скоростью, например поверхности деталей камер сгорания двигателей (в первую очередь поршней и головок цилиндров), поверхности выпускных клапанов. Подвидом эрозионного изнашивания является электроэрозионное изнашивание, которое заключается в вырывании частиц металлов с поверхностей в результате воздействия дуги электрического разряда, например в контактах системы зажигания.

Кавитационное изнашивание происходит при омывании твердого тела жидкостью. Обусловлено местными изменениями давлений и температур. Например, в двигателях этому виду изнашивания подвержены внешние поверхности мокрых гильз цилиндров, лопастей водяного насоса и т.д.

Каждый из видов изнашивания редко встречается в чистом виде, обычно они проявляются комплексно. Например, если лопасти водяного насоса подвержены только кавитационному изнашиванию, то на зеркале цилиндра, кроме кавитационного, наблюдаются в большей или меньшей степени все виды изнашивания.

В последние годы изучают так называемое **водородное изнашивание**. Механизм водородного изнашивания представляется следующим. Атомы водорода получают при трении сопряженных поверхностей в процессе разложения смазки и воды. Поскольку температура десорбции водорода на много сотен градусов выше

температуры десорбции смазки, то в процессе трения атомы водорода постепенно занимают освободившиеся от молекул смазки места на поверхности. Поскольку размеры водородных атомов меньше константы кристаллической решетки, то затем они проникают в глубь металла, в дефекты структуры (например, в зародышевые трещины), собираются там в молекулы. Газовый объем их увеличивается. Не найдя выхода, он распирает дефектные полости изнутри до тех пор, пока внутреннее давление в дефектах не разрушит металл по всем развившимся и соединившимся трещинам.

При трении обычных металлов (сталь, чугун, алюминий) процесс разрушения эндотермический (с поглощением теплоты). Большая нагрузка при трении вызывает повышение температуры в глубине материала детали. Водород стремится в зону высокой температуры, поэтому его разрушительное действие проявляется на некоторой глубине, а иногда и по всему объему. В последнем случае весь нагруженный и нагретый участок детали может рассыпаться в порошок (например, при трении бандажа колеса вагона о чугунную тормозную колодку).

При трении деталей из титана с обычной смазкой изнашивание значительно выше, чем при сухом трении. Это связано с быстрой деструкцией смазочных масел и интенсивным наводороживанием металла, который образует с водородом твердые растворы и химические соединения. Процесс в этом случае наоборот идет с выделением теплоты, а водород перемещается от нагретых объемов к холодным.

7.6. Отказы по параметрам коррозии

Коррозия — это разрушение металла вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой (агрессивная атмосфера, растворы кислот, щелочей, солей и т. п.). Под коррозионной надежностью понимается свойство изделий сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в условиях взаимодействия с коррозионной средой. Коррозия может не только являться процессом, приводящим к отказам, но она может также ускорять процессы изнашивания, усталостного разрушения, снижать прочностные и деформационные свойства материалов.

Критериями отказов по параметрам коррозии может быть величина коррозии или ее скорость. В тех случаях, когда бывает необходимо регламентировать или оценить надежность изделий в зависимости от коррозионного разрушения или проводить ее оценку при различных видах коррозии, могут использоваться показа-

тели: средняя наработка на отказ при коррозии, срок сохранности при коррозии и др.

При необходимости вид коррозии должен конкретизироваться, например, средняя наработка при атмосферной коррозии, срок сохранности при газовой коррозии и т. п.

Данные показатели коррозионной надежности выражаются через параметры коррозионной стойкости, характеризующей способность металла сопротивляться коррозионному воздействию среды. Коррозионная стойкость оценивается:

- изменением массы металла в результате коррозии, отнесенным к единице поверхности и единице времени;
 - объемом выделяющегося водорода (или поглощенного кислорода) в процессе коррозии, отнесенным к единице поверхности и единице времени;
 - уменьшением толщины металла вследствие коррозии, выраженным в линейных единицах и отнесенным к единице времени;
 - изменением какого-либо показателя механических свойств за определенное время коррозионного процесса, выраженным в процентах, или временем до разрушения образца заданных размеров;
 - изменением отражательной способности поверхности металла за определенное время коррозионного процесса, выраженным в процентах;
 - плотностью тока, отвечающей скорости данного коррозионного процесса;
 - временем до появления первого коррозионного очага на образце заданных размеров или числом коррозионных очагов на образце по истечении заданного времени.
- Критериями отказов из-за коррозии могут быть:
- разрушение детали из-за коррозии;
 - достижение допустимого изменения массы или толщины металла под действием процесса коррозии;
 - появление коррозионного очага на поверхности изделия;
 - превышение допустимого уровня скорости коррозии или скорости проникновения коррозии и др.

7.7. Диаграмма изнашивания и методы измерения износа деталей автомобилей

Процесс изнашивания поверхностей деталей любой техники, в частности автомобилей, подразделяют на три периода (рис. 7.2).

За *период приработки* (начального изнашивания) t_1 осуществляется макро- и микрогеометрическая приработка поверхностей трения деталей и стабилизация показателей технического состоя-

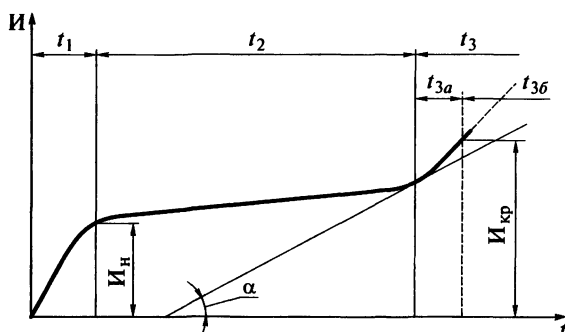


Рис. 7.2. Диаграмма изнашивания деталей автомобилей:

t_1 — период приработки; t_2 — период стабильного или нормального изнашивания; t_3 — период предельного изнашивания (t_{3a} — ускоренного изнашивания до критического износа, $t_{3б}$ — изнашивание после критического износа); α — угол, характеризующий наклон касательной к графику, характеризующий темп изнашивания; I_n — начальный износ; $I_{кр}$ — критический износ

ния агрегатов и механизмов, в которые входят эти детали. Для большинства конструктивных элементов (КЭ) современных автомобилей полная приработка по пробегу автомобиля составляет 3...3,5 % от их ресурса до капитального ремонта (КР) или списания.

За период *стабильного (нормального) изнашивания* t_2 происходит умеренно-ускоряющееся или постепенное изнашивание поверхностей деталей автомобилей. Этот период называют еще *эксплуатационным* и *рабочим* периодом, в течение его автомобиль выполняет заданную работу при относительно стабильных технических характеристиках и нормах технической эксплуатации автомобиля (ТЭА). Период по пробегу составляет до 95 % от ресурса КЭ автомобиля до КР или списания.

После начала периода *предельного изнашивания* t_3 наблюдается прогрессирующее или катастрофическое изнашивание. Оно происходит после наступления предельного состояния КЭ автомобиля. Эксплуатация изделия в этот период крайне нежелательна в силу не только резкого возрастания изнашивания поверхностей деталей, но и по соображениям потери эффективности работы, безопасности и экологичности, например предельное состояние автомобильного двигателя. Резко увеличивается расход топлива и особенно моторного масла — эксплуатация неэффективна. Резко увеличивается токсичность отработавших газов — эксплуатация небезопасна. К тому же в любое время из-за низкого давления в смазочной системе может произойти «заклинивание» двигателя. После так называемого критического износа эксплуатация агрегата, в который входит данная деталь, должна быть прекращена.

7.8. Методы определения износа деталей машин

7.8.1. Периодическое измерение износа

Для оценки технического состояния элементов автомобилей и прогнозирования их надежности необходимо определять износ трущихся деталей. Существующие методы определения износа элементов машин разделены на две группы: методы периодического измерения износа и методы непрерывного измерения износа в процессе работы машины.

Периодическое измерение износа производится при оценке технического состояния, надежности элементов машин. При исследовании закономерностей изнашивания элементов машин с целью прогнозирования их надежности предпочтение отдается методам непрерывного измерения износа. Основными недостатками методов непрерывного измерения износа являются их сложность и необходимость в оснащении машины специальной аппаратурой и приспособлениями. В связи с этим более широкое применение нашли методы первой группы.

Методы периодического измерения износа включают метод микрометрических измерений, метод искусственных баз, методы определения износа по потере массы и по содержанию продуктов износа в масле и метод профилографирования.

В сфере автомобильного транспорта России износы деталей измеряют методом непосредственных геометрических измерений с использованием мерительного инструмента — микрометры, нутромеры, штангенциркули, скобы с индикаторами и без них и т.д. При доводке автомобилей и их КЭ на заводе-изготовителе в период их испытаний применяются более точные методы.

Метод микрометрических измерений основан на измерении контрольных параметров деталей с помощью одного из следующих инструментов: микрометра, штангенциркуля, индикаторного нутромера, а также с помощью рычажно-оптических приборов и инструментальных микроскопов. Точность измерений в зависимости от применяемого мерительного инструмента составляет

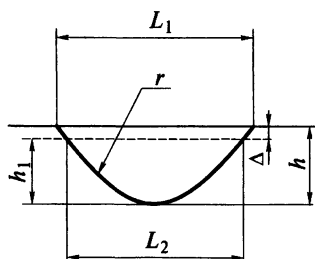


Рис. 7.3. Измерение износов методом лунок: r — радиус лунки; L_1 и h — длина и глубина старой лунки; L_2 и h_1 — длина и глубина изношенной лунки; Δ — искомый износ

0,01...0,001 мм. Основным недостатком этого метода является необходимость разборки механизма перед проведением измерений.

Одним из наиболее практичных является *метод искусственных баз*, или *метод лунок*, вырезанных на поверхности трения детали. В процессе испытаний обмеряют геометрические характеристики лунки на новой детали и после ее демонтажа при определенном пробеге. По разнице в измерениях судят о реальных износах поверхностей (рис. 7.3).

Величины износов Δ вычисляют по формулам:
для плоских поверхностей

$$\Delta = \frac{0,125(L_1^2 - L_2^2)}{r}; \quad (7.4)$$

для цилиндрических поверхностей

$$\Delta = 0,125(L_1^2 - L_2^2) \left(\frac{1}{r} \pm \frac{1}{R} \right), \quad (7.5)$$

где Δ — искомый износ; L_1 — длина старой лунки; L_2 — длина изношенной лунки; r — радиус лунки; R — радиус окружности поперечного сечения цилиндрической поверхности; «+» — если поверхность выпуклая; «-» — если поверхность вогнутая.

Метод искусственных баз заключается в нанесении на рабочую поверхность углубления правильной геометрической формы, по изменению глубины которого судят о величине линейного износа. Углубления наносят с помощью алмазного или твердосплавного инструмента. Измеряют геометрические параметры углубления с помощью оптических измерительных приборов. Недостатками метода искусственных баз являются низкая точность измерений, большая трудоемкость операций и необходимость разборки механизма.

Метод определения износа по потере массы деталей сопряжения заключается в периодическом взвешивании детали. В качестве измерительных средств используют весы различных типов: приборные ПР-500, аналитические ВЛА-200, АДВ-200, ВНЗ-2 и др. Точность метода зависит от точности весов и находится в пределах $(0,05...5) \cdot 10^{-6}$ г. Основными недостатками метода являются необходимость разборки механизма для проведения измерений и то, что масса и размеры деталей ограничены возможностями применяемых измерительных средств.

Достаточно широкое применение для измерения износов поверхностей деталей на заводах — изготовителях автомобилей нашел *метод профилографирования*. Он наиболее часто используется при обмере цилиндрических поверхностей и отверстий путем снятия и наложения макропрофилограмм новой и поработавшей деталей (рис. 7.4).

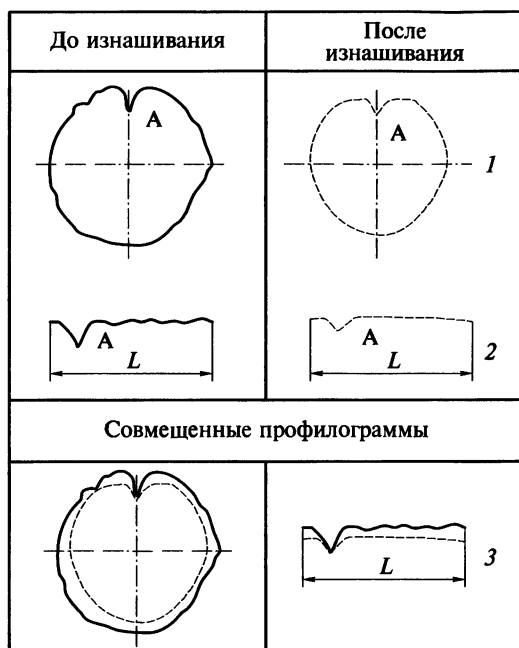


Рис. 7.4. Измерение износов методом профилографирования:

1 — в поперечном сечении; 2 — в продольном сечении; 3 — совмещенные профилограммы; А — метка для совмещения; L — длина измеренного участка

Для правильного совмещения макропрофилограмм, снятых с новой и изношенной деталей, на испытуемой поверхности предварительно наносят отметки твердосплавным инструментом.

Разница размеров на профилограммах показывает величины реальных износов поверхности детали в этом сечении.

Метод профилографирования заключается в снятии с контрольного участка рабочей поверхности детали профилограммы до начала работы механизма и после истечения установленного времени. По разнице высоты выступов микронеровностей определяют линейный износ. Измерительными средствами в этом случае служат профилографы. Точность метода профилографирования весьма высока. Основные недостатки те же, что и при определении износа по потере массы детали.

Ранее описаны методы измерения износов деталей, требующие полной или частичной разборки агрегатов или механизмов автомобилей. Более практичными для этих целей следует считать методы измерений износов деталей автомобилей по косвенным показателям.

Это в первую очередь *метод спектрального анализа*, который в практике носит название метод «железо в масле». Заключается он в сжига-

нии масляных проб в вольтовой дуге, сборе продуктов сгорания в призму и получении за счет пучка света интерференционной картинки, на которой примеси каждого металла имеют свой цвет.

Метод определения износа по содержанию продуктов износа в масле применяют, как правило, для металлических деталей.

Содержание металлических частиц в отработанном масле, определяемое физико-химическими методами, является показателем массового износа деталей механизма.

Основное достоинство метода в том, что он не требует разборки механизма. К числу недостатков метода следует отнести низкую точность измерений и трудности при определении износа одной из деталей сопряжения.

7.8.2. Непрерывное измерение износа

Непрерывное измерение износа в процессе работы машины выполняют различными методами: определения износа по расходу рабочей среды, по изменению давления рабочей среды, тензометрического микрометрирования, радиоактивных изотопов, электромагнитной индукции.

При определении износа с помощью тензометрического микрометрирования в контакт с изнашивающейся деталью вводят упругий элемент с наклеенными на него тензометрическими датчиками. При изменении поверхности детали вследствие изнашивания упругий элемент деформируется, посылая электрический сигнал с помощью тензодатчиков на гальванометр или осциллограф. К числу недостатков метода следует отнести большую техническую сложность измерений и сравнительно узкие пределы измерения износа: 0,0001...0,1 мм.

В методе определения износа с помощью радиоактивных изотопов в поверхностные слои материала трущихся деталей вносят радиоактивный изотоп.

Существует несколько способов внесения изотопа в поверхностные слои детали. В исследованиях процессов изнашивания элементов машин наибольшее распространение получил метод вставок. При этом методе активирования заранее приготовленные радиоактивные вставки запрессовываются в специальные углубления на рабочей поверхности исследуемой детали. Радиоактивные вставки, как правило, изготавливают цилиндрической формы диаметром 0,7...1,0 мм и длиной 1,0...1,5 мм. Материал вставок по своим физико-механическим свойствам не должен существенно отличаться от материала исследуемой детали. Активирование детали методом вставок дает возможность наблюдать не только за суммарным износом рабочей поверхности, но позволяет также исследовать характер изнашивания отдельных участков детали.

В процессе изнашивания частицы материала, меченные изотопом, попадают в смазку и отводятся из зоны трения. Увеличение радиоактивности смазки, измеряемое с помощью счетчика элементарных частиц, позволяет судить о характере изменения износа рабочих поверхностей деталей. Существенные недостатки этого метода заключаются в сложности подготовки детали, в необходимости применения специальной аппаратуры, а также низкой точности результатов измерений.

Анализ существующих методов измерения износа показывает, что среди них нет универсального метода, который позволил бы с достаточной точностью оценить износ рабочих поверхностей каждой из деталей сопряжения независимо от конструкции механизма, геометрической формы, размеров и кинематики движения деталей. Поэтому в каждом отдельном случае приходится подбирать, а зачастую и разрабатывать заново наиболее подходящий метод, измерительную аппаратуру и оборудование.

7.9. Влияние остаточных деформаций и старения материалов на износ деталей

Остаточные деформации деталей возникают при больших давлениях на поверхности или при больших нагрузках, вызывающих напряжения, которые являются для данного материала предельно допустимыми или близкими к ним. В первом случае появляется смятие поверхностей, во втором — скручивание, изгиб.

Смятие поверхностей характерно для деталей, работающих в условиях больших ударных нагрузок при отсутствии относительного смещения поверхностей деталей. В качестве примера можно указать на деформацию зубьев муфт полужесткого соединения элементов силовой передачи, смятие шлицов балансиров и торсионов ходовой части, шпонок и др.

В начальный период работы деталей зазоры и динамические нагрузки небольшие. Пластическая деформация поверхностей происходит постепенно и сопровождается лишь некоторым уплотнением поверхностных слоев. С увеличением зазоров и, следовательно, динамических нагрузок начинается течение материала, появляются трещины и сколы.

Скручивание и изгиб, вызванные высокими напряжениями материала, наблюдаются наиболее часто на упругих элементах (пружинах, торсионах, рессорах). У них причинами деформации являются напряжения, превышающие предел упругости.

Независимо от механических воздействий все свойства автомобильных конструкционных и эксплуатационных материалов со временем изменяются, происходит так называемое старение материалов. Конструкционные материалы теряют пластичность и

упругость. Эксплуатационные материалы теряют смазочные и прочие свойства. Они чаще всего насыщаются водой, т.е. происходит деградация. Это вызывает коррозию омываемых ими поверхностей деталей. Масла и смазки в процессе работы коксуются при более низких температурах.

Резинотехнические изделия подвергаются растрескиванию и теряют упругость и эластичность в результате окисления, термического воздействия, солнечной радиации, влажности воздуха, воды, химического воздействия эксплуатационных материалов.

Старение металлов в целом полезно, так как при этом в их объемах выравниваются остаточные напряжения, если, однако, не происходит недопустимого изменения геометрических размеров деталей. Старение — это отпуск металлов, происходящий при невысокой температуре. При старении в объеме металлов (сплавов) выравниваются внутренние напряжения, другими словами, металл (сплав) переходит структурно в более устойчивое состояние, при котором он работает существенно дольше.

По своему воздействию на отказы автомобилей и его КЭ указанные процессы изменения ТС имеют следующее процентное соотношение (табл. 7.1).

Процессы изменения технического состояния КЭ автомобилей обусловлены целым рядом причин и внешних условий, рассмотренных далее. К их числу относятся условия эксплуатации автомобилей, эксплуатационные режимы работы их КЭ (в частности, в период обкатки), качество эксплуатационных материалов. Причины и закономерности изнашивания автомобильных шин сведены в отдельный раздел, так как имеют специфический характер. Своевременность и качество проведения ТО и ремонта также влияют на интенсивность изменения параметров ТС автомобилей и их КЭ, но рассматриваются в других разделах ТЭА.

Таблица 7.1

Процентное соотношение причин отказов для автомобилей при пробеге 100 тыс. км

Причина отказа	Автомобиль	
	грузовой	автобус
Изнашивание	40	37
Пластические деформации и прочностные разрушения	26	29
Усталостные разрушения	18	16
Старение	12	11
Прочие	4	7

7.10. Оценка надежности элементов и технических систем автомобилей при их проектировании

Технические задания на проектирование большинства элементов современных автомобилей содержат требования к надежности, которые разработчик и изготовитель обязаны обеспечить в процессе их создания. Одним из путей обеспечения и проверки надежности новых механизмов на соответствие требованиям технического задания является расчетная оценка надежности этих механизмов на различных стадиях проектирования.

Проектирование элементов технических систем автомобилей состоит из трех основных этапов: эскизного, технического и рабочего. На каждом этапе решаются определенные задачи по оценке надежности механизмов:

- на этапе эскизного проекта — определение и выбор наиболее надежного варианта конструкции механизма;
- на этапе технического проекта — оценка уровня надежности выбранного варианта конструкции и сравнение с заданными показателями;
- на этапе рабочего проекта — уточнение расчетов надежности механизмов с учетом дополнительных данных по результатам модельных испытаний составных узлов.

Некоторые принципиальные положения методики оценки надежности на стадии проектирования технических систем заключаются в следующем.

Прежде всего механизмы в соответствии с принятой альтернативной формулировкой отказа относят к так называемым простым системам. Под простой системой согласно формулировке Госстандарта [9] понимают совокупность взаимосвязанных элементов, обеспечивающих выполнение заданных функций с одним определенным уровнем качества функционирования. *Элемент* — это часть механизма, выполняющая определенные функции и не подлежащая дальнейшему расчленению при данной степени подробности рассмотрения. Элементами механизмов автомобилей могут быть детали, узлы, агрегаты, приборы и их части.

Ранее было показано, что у систем автомобилей проявляются как внезапные, так и постепенные отказы. Таким образом, в основу оценки надежности механизмов на стадиях проектирования может быть положен принцип расчета надежности простых систем, обладающих альтернативными свойствами функционирования и имеющих два типа отказов — внезапные и постепенные.

В этом случае можно принять следующую схему расчета:

- определение цели расчета;
- определение допущений, принимаемых в расчете;

- конкретная формулировка отказа оцениваемого механизма;
- построение структурно-логических схем механизма и его узлов;
- расчет безотказности механизмов с учетом внезапных отказов;
- определение и выбор основных параметров, изменяющихся в процессе работы механизма, по данным об аналогах и расчетным схемам проекта;
- расчет безотказности механизмов с учетом постепенных отказов;
- расчет безотказности механизмов с учетом отказов обоих типов;
- оценка долговечности механизмов по элементам первой и второй групп;
- оценка ремонтпригодности механизмов по данным об аналогах.

При оценке надежности технические системы рассматривают как элементы, работающие до первого отказа за период непрерывной работы, установленный техническими требованиями. Поэтому в качестве показателей надежности принимают следующие:

- вероятность безотказной работы за время эксплуатации;
- средняя наработка до отказа;
- средний, или гамма-процентный, ресурс до капитального ремонта;
- средний ресурс до списания;
- срок службы до списания.

Указанные показатели в полном объеме характеризуют надежность, например, двигателя внутреннего сгорания, отказы которого носят как внезапный, так и постепенный характер.

Одним из основных способов повышения надежности технических систем при их проектировании и изготовлении является *резервирование*, т.е. структурная избыточность, предполагающая наличие в системе дополнительных элементов, не являющихся функционально необходимыми. На рис. 7.5 показана классификация методов резервирования.



Рис. 7.5. Классификация методов резервирования

Отношение числа резервных элементов к числу основных называется *кратностью* резерва. Резервирование с кратностью, равной единице, называется *дублированием*.

Резерв по характеру нагружения делится:

- на нагруженный, при этом резервный элемент работает с той же интенсивностью, что и основной;
- облегченный, когда резервный элемент работает с меньшей интенсивностью, до тех пор, пока не отказал основной;
- ненагруженный, в этом случае резервный элемент не используется до тех пор, пока не вышел из строя основной.

По масштабу резервирования различают следующие виды резервов:

- общий резерв, при котором используется целая резервная система (дополнительный автомобиль в комплекте машин);
- отдельный резерв, который предусматривает резервирование отдельных элементов системы (всех или только некоторых, наименее надежных, например, запасное колесо автомобиля).

По восстанавливаемости отказавших элементов различают:

- резервирование с восстановлением, при котором восстановление отказавших основных и (или) резервных элементов технически возможно без нарушения работоспособности объекта в целом;
- резервирование без восстановления, при котором восстановление отказавших элементов (основных и (или) резервных) технически невозможно без нарушения работоспособности объекта в целом.

Повышение надежности подверженных старению технических систем в процессе эксплуатации может быть обеспечено только резервированием методов ремонта:

- нагруженным эксплуатационным резервированием, т.е. повышением ремонтпригодности изделия до уровня, исключающего образование критических дефектов, которые могли бы вызвать неремонтпригодное состояние объекта в течение определенной наработки;
- ненагруженным эксплуатационным резервированием — заменой отказавших элементов системы на ремонтные комплекты.

Знание основного закона повышения надежности технических систем, подверженных старению, позволяет обоснованно и более эффективно использовать потенциальные возможности ремонта машин в современном промышленно развитом обществе.

Таким образом, методами ремонта не только устраняют отказы машин, как это делалось в начальный период автомобилизации страны, но и достигают возможность увеличения наработки до предельного состояния, обеспечивающей повышение эффективности техники за счет обоснованного выбора эксплуатационного резервирования.

Эксплуатационное резервирование обеспечивает повышение надежности технических систем за счет введения избыточности. Введение избыточности означает, что при изготовлении и(или) ремонте машин предусматриваются дополнительные устройства, технические мероприятия и средства сверх минимально необходимых для выполнения системой заданных функций.

Нагруженное эксплуатационное резервирование осуществляется в процессе разработки конструкции системы и достигают повышением уровня ремонтпригодности путем введения избыточности, исключающей возможность образования критических дефектов, которые могут привести к неремонтпригодному состоянию системы или ее основных элементов в течение основной работы.

В этом случае повышения уровня ремонтпригодности достигают увеличением наработки системы до предельного состояния и превышающей по величине наработку, назначенную на стадии конструирования.

Ненагруженное эксплуатационное резервирование предусматривает создание избыточности за счет заранее изготовленных ремонтных комплектов, которые используются для замены отказавших элементов системы.

7.11. Наиболее распространенные способы и методы обеспечения и прогнозирования надежности, используемые при создании машин

Обеспечение надежности машин требует реализации комплекса мероприятий, которые охватывают все основные стадии жизненного цикла машины: проектирование, изготовление и эксплуатацию. Максимальной надежности техники достигают в случае, когда на каждой стадии решают свои специфические задачи, а не производят исправление ошибок, допущенных на предыдущих этапах. Огромное значение для создания надежных машин и средств автоматизации имеет организация обратных связей, с помощью которых проектировщик получает информацию о фактической надежности машины, режиме ее эксплуатации и достигнутом уровне надежности в реальных условиях эксплуатации.

Основными способами обеспечения надежности технических систем являются конструктивные, технологические (при проектировании и изготовлении) и эксплуатационные (при эксплуатации).

К конструктивным мероприятиям относятся следующие:

1) упрощение конструктивной схемы системы, уменьшение числа составляющих элементов без ущерба для ее функциональ-

ных свойств, т.е. рационализация конструкции и компоновки машины. Как было показано ранее, надежность системы выше при меньшем числе элементов, если отказ каждого из них приводит к отказу системы в целом;

2) замена элементов, ограничивающих надежность технической системы, на более надежные. Очевидно, что более надежны изделия, имеющие в своем составе хорошо проверенные и апробированные в эксплуатации элементы, требующие минимального технического эксплуатационного обслуживания;

3) выбор долговечных материалов деталей и рациональных их сочетаний в сопряжениях. При этом исходят из необходимости обеспечения заданной долговечности машины, узла, агрегата при минимальной стоимости. В то же время учитывают условия работы, вид изнашивания, назначение детали. В зависимости от назначения деталей их изготавливают из конструкционных, износостойких, антифрикционных, фрикционных, антикоррозионных и других материалов. Все больше применяют полимерные материалы;

4) повышение запаса прочности деталей и ограничение уровня нагрузок на конструкцию. Внезапные отказы при эксплуатации автомобилей возникают, как правило, в результате превышения предельно допустимых нагрузок. Одним из путей повышения безотказности машины является увеличение запаса прочности ее элементов. Запас прочности может быть повышен увеличением размеров деталей (что отрицательно сказывается на повышении металлоемкости машины), подбором материалов деталей с более высокими механическими характеристиками (пределом прочности, усталости и т.п.), путем рационализации форм (уменьшение числа концентраторов напряжений).

Для защиты конструкций технической системы от возникающих периодических перегрузок, а также от аварийных усилий, возникающих в результате ошибок оператора или системы управления, встречи рабочего органа с неожиданным препятствием и т.п., в конструкции машин предусматривают установку предохранительных клапанов, ограничителей скорости и т.д.;

5) защита элементов технической системы от разрушающих действий окружающей среды. На интенсивность изнашивания элементов машины значительное влияние оказывают особенности окружающей среды: влажность, запыленность, наличие абразивных частиц в пыли, температура окружающего воздуха. Чтобы избежать вредного воздействия перечисленных факторов, на машине должны быть предусмотрены возможность установки защитных кожухов, применение антикоррозионных и коррозионно-стойких материалов, герметизация ответственных узлов и деталей, применение эффективных смазочных систем и фильтров;

6) агрегатирование (модульность) конструкции технической системы. Агрегатирование — метод компоновки машин из агрега-

тов — унифицированных взаимозаменяемых модулей, выполняющих определенные функции. Агрегатирование удешевляет машину, повышает серийность производства, следовательно, стабильность качества элементов, повышает приспособленность узлов к модернизации;

7) обеспечение контролепригодности и ремонтпригодности. Контролепригодность технической системы реализуется путем установки встроенной аппаратуры (датчиков, приборов и т.п.) для оценки технического состояния машины в ходе эксплуатации, что позволяет предвидеть момент отказа и своевременно принять меры для восстановления работоспособности. Значительно повышают контролепригодность технических систем встроенные системы технической диагностики типа Boss, Edimos, Likkon и др. [18].

Время устранения отказа в случае его возникновения в значительной степени определяется ремонтпригодностью технической системы. Поэтому при разработке конструкции необходимо обеспечить возможность легкого доступа к наименее надежным сборочным единицам, удобство выполнения регулировочных и смазочных работ, а при необходимости и замены элементов;

8) обеспечение благоприятных условий работы деталей и смазывания трущихся поверхностей, создание оптимальных температурных режимов работы сопряжений. У современных двигателей все основные сопряжения смазываются под давлением. Условия смазывания трущихся деталей улучшают применением современных высококачественных смазочных материалов и совершенствованием формы поверхностей деталей;

9) разработка эффективных устройств для очистки воздуха, топлива, масел и рабочих жидкостей;

10) ограничение опасных последствий отказов. Это требование особенно важно для машин, отказы которых имеют не только экономические последствия, но и представляют угрозу для безопасности людей и окружающей среды (транспортные средства, грузоподъемные машины и т.д.). Для снижения тяжести последствий отказа необходимо предусматривать конструктивные решения, снижающие последствия отказа (гидрозамки и отсечные клапаны в системах гидравлического привода, реле в электрических системах бортового питания автомобиля, предохраняющих от короткого замыкания и т.п.);

11) структурное резервирование, широко применяемое для повышения надежности таких элементов, отказ которых имеет серьезные последствия с точки зрения безопасности, так как повышение надежности таким способом ведет к увеличению стоимости машины;

12) защита техники от случайных ошибок персонала. Это требование выполняется созданием комфортных условий работы водителя, рациональным расположением органов управления, при-

менением блокировочных устройств и другим решениям, снижающим и нагрузку на водителя.

К технологическим мероприятиям повышения надежности в процессе производства технических систем относятся следующие:

1) тщательный подбор материалов деталей в соответствии с требованиями технической документации и контроль их качества для своевременного обнаружения скрытых дефектов или несоответствия физико-механических свойств требуемым свойствам;

2) упрочнение деталей и их рабочих поверхностей термической, химико-технической обработкой и поверхностным пластическим деформированием;

3) повышение износостойкости или коррозионной стойкости деталей путем нанесения специальных покрытий. Например, хромирование рабочих поверхностей гильз цилиндров и шеек коленчатых валов позволяет повысить их ресурс в 2—3 раза при увеличении стоимости на 4 %;

4) строгое соблюдение технологии производства и ее совершенствование. Несоблюдение режимов обработки материалов и деталей приводит к сокращению их срока службы. Технологические процессы изготовления деталей должны строго соответствовать технической документации;

5) повышение требований к точности основных размеров деталей и к качеству их поверхности. Обеспечение высоких технических характеристик качества поверхности возможно срезанием неровностей поверхности тонким шлифованием, хонингованием, полированием, электромагнитной обработкой и т. п. Вид обработки определяется геометрическими параметрами детали, ее материалом и функциональным назначением;

6) применение автоматизированного оборудования с программным управлением, обеспечивающим высокую точность и стабильность характеристик качества деталей автомобилей. Автоматизация производственных процессов позволяет в значительной степени уменьшить отклонения размеров деталей, обусловленные субъективными факторами;

7) внедрение на предприятии системы качества. Проблема обеспечения надежности техники на стадии производства в значительной степени сводится к обеспечению качества изготовления, что реализуется на современном этапе внедрением системы качества, которая имеет своей целью не только отбраковывать дефектные изделия, но и не допустить их изготовления. Большинство ведущих фирм — изготовителей техники внедряют на своих производствах системы контроля качества, соответствующие ИСО 9000.

Эксплуатационные мероприятия по обеспечению надежности технических систем включают в себя:

- повышение квалификации обслуживающего персонала и водителей;

- строгое соблюдение рекомендаций заводских инструкций по эксплуатации машин;
- обеспечение стабильных нормальных режимов работы машины; соблюдение правил технической эксплуатации машины (транспортирования, хранения, технического обслуживания и ремонта, монтажа и демонтажа);
- совершенствование организации технической эксплуатации; внедрение диагностики;
- оптимизацию режимов и периодичности диагностирования, ТО и Р машин;
- переход от эксплуатации машин по наработке к эксплуатации по фактическому техническому состоянию;
- внедрение системы управления качеством эксплуатации строительных машин;
- совершенствование системы сбора, обработки и анализа информации о надежности строительных машин, разработка рекомендаций по повышению надежности машин и их элементов.

Для определения закономерностей изменения технического состояния машины в процессе работы выполняется прогнозирование надежности машин.

Основой прогнозирования технического состояния является *прогностика* — научная дисциплина, изучающая вероятностное поведение прогнозируемых систем в зависимости от изменения параметров прогнозирующих систем.

Различают три этапа прогнозирования: ретроспекцию, диагностику и прогноз.

На первом этапе устанавливают динамику изменения параметров машины в прошлом, на втором этапе определяют техническое состояние элементов в настоящем, на третьем — прогнозируют изменение параметров состояния элементов в будущем.

Основные классы задач прогнозирования надежности технических систем могут быть сформулированы следующим образом:

- 1) предсказание закономерности изменения надежности технических систем в связи с перспективами развития производства, внедрением новых материалов, повышением прочности деталей;
- 2) оценка надежности проектируемой технической системы до того, как она будет изготовлена. Эта задача возникает на стадии проектирования;
- 3) прогнозирование надежности конкретной технической системы (узла, агрегата) на основании результатов изменения ее параметров;
- 4) прогнозирование надежности некоторой совокупности технических систем по результатам исследования ограниченного числа опытных образцов. С задачами такого типа приходится сталкиваться на этапе производства техники;

5) прогнозирование надежности технических систем в необычных условиях эксплуатации (например, при температуре и влажности окружающей среды выше допустимой).

В зависимости от длительности прогнозируемого периода различают прогнозы: краткосрочные (до 5 лет), среднесрочные (5—15 лет), долгосрочные (свыше 15 лет). Глубину ретроспективного анализа определяют из условия превышения его в 2—3 раза по сравнению с прогнозируемым периодом.

Специфика отрасли автомобилестроения предполагает точность решения задач прогнозирования с погрешностью не более 15 % и использование методов прогнозирования, позволяющих получить решение задач в кратчайшие сроки. Методы прогнозирования надежности технических систем выбирают с учетом задач прогнозирования, количества и качества исходной информации, характера реального процесса изменения показателя надежности (прогнозируемого параметра).

Современные методы прогнозирования могут быть разделены на три основные группы:

- методы экспертных оценок;
- методы моделирования, включающие физические, физико-математические и информационные модели;
- статистические методы.

Методы экспертных оценок заключаются в обобщении, статистической обработке и анализе мнений специалистов относительно перспектив развития данной области. К ним относятся метод Дельф, «мозговой штурм», метод FBME [18] и т.п.

Методы моделирования базируются на основных положениях теории подобия.

Статистические методы прогнозирования основаны на экстраполяции и интерполяции прогнозируемых параметров надежности, полученных в результате предварительных исследований. В основу этих методов положены закономерности изменения параметров надежности машин во времени.

Документом, устанавливающим комплекс организационно-технических мероприятий для обеспечения заданных требований по надежности, осуществляемых на этапах проектирования, производства и эксплуатации, является программа обеспечения надежности (ПОН). В программе указывают:

- конкретные меры по обеспечению надежности;
- подразделение и исполнителей указанных работ;
- сроки выполнения мероприятий;
- виды и формы отчетных документов, позволяющих проверить полноту и качество выполнения каждого мероприятия;
- действующие и подлежащие разработке нормативно-технические и (или) методические документы, которыми необходимо руководствоваться при выполнении указанных мероприятий.

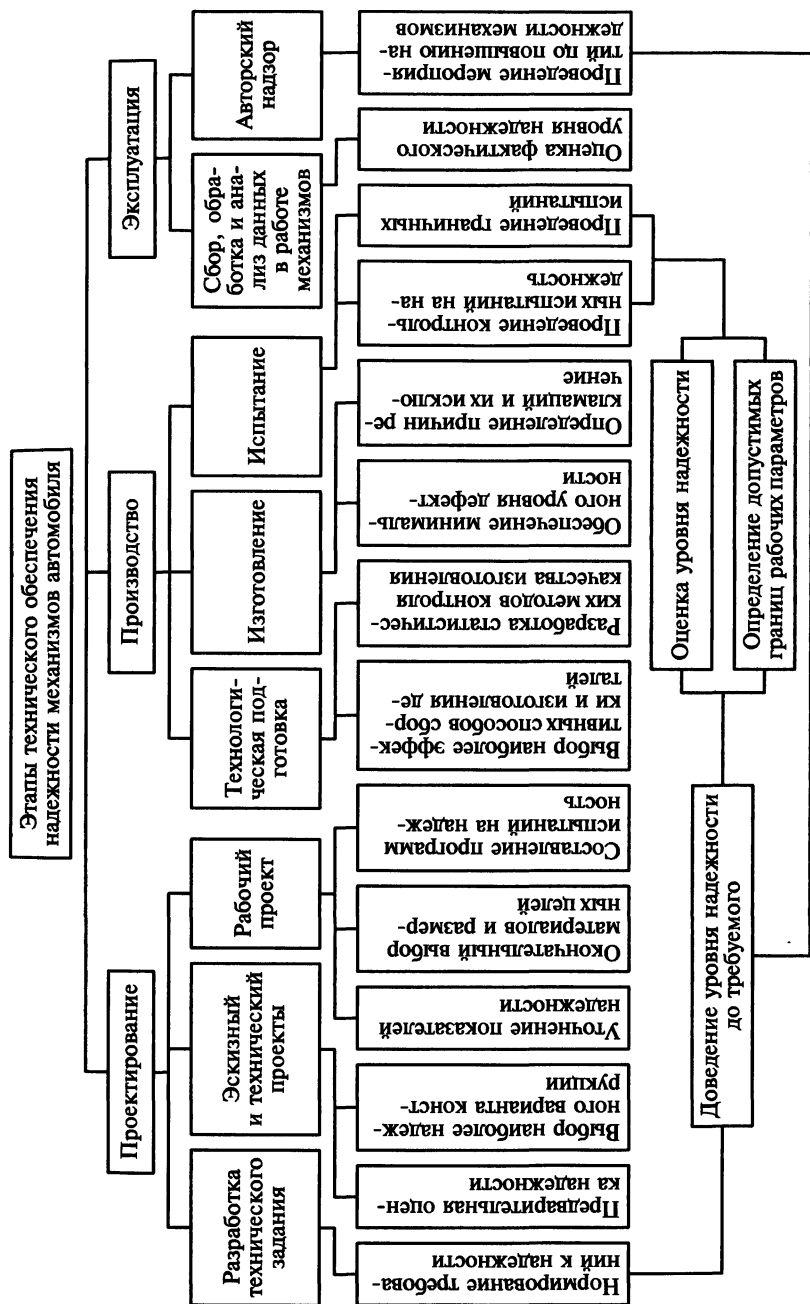


Рис. 7.6. Этапы технического обеспечения надежности механизмов автомобиля

На рис. 7.6 представлена схема поэтапного обеспечения надежности технических систем. На этапе разработки изделия необходимо знать, насколько принятые конструктивные решения отвечают заданным требованиям, чтобы, во-первых, иметь возможность корректировать проект, а во-вторых, определять требования к контролю на стадии производства. Поэтому в рассматриваемой схеме основной объем работ по количественной оценке надежности создаваемого механизма приходится на стадию проектирования и включает в себя:

- установление характеристики отказов механизма;
- оценку надежности по данным об аналогах;
- оценку безотказности и долговечности.

Рассмотрение влияния внешнего воздействия на работоспособность конструкции технических систем позволяет установить основные характеристики их отказов, в том числе:

- формулировку отказов и предельных состояний;
- признаки отказов и вызвавшие их причины;
- способы устранения отдельных видов отказов;
- места отказов.

Такой анализ является основой для построения расчетной схемы, учитывающей связь физики образования отказов с вероятностными характеристиками надежности технической системы.

Построение расчетной схемы надежности технической системы включает в себя составление структурно-логической схемы, содержащей несколько групп элементов, каждая из которых характеризуется определенной причиной образования отказов и описывается соответствующей математической моделью. Оценка надежности аналогов заключается в проведении наблюдений по планам ГОСТ 16504—81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения» и оценке показателей. В случае расхождений полученных показателей надежности аналогов с заданными проводят мероприятия по повышению надежности слабых мест конструкции проектируемой технической системы.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы могут быть отнесены к основным причинам отказов элементов и технических систем в целом?
2. Что является основной причиной отказов в процессе изготовления или ремонта объекта?
3. Какие отказы относят к эксплуатационным и что является их причиной?
4. Какие физико-химические процессы приводят к отказам конструктивных элементов?

5. Приведите примеры отказов технических систем по параметрам прочности.
6. Какое место занимают трибологические отказы в проблеме надежности технических систем?
7. Какие известны виды изнашивания деталей автомобиля?
8. Приведите примеры отказов по параметрам коррозии.
9. Нарисуйте диаграмму изнашивания и поясните ее.
10. Какие методы применяют для измерения износа деталей автомобилей?
11. Как влияют остаточные деформации и старение материалов на износ деталей?
12. Как обеспечивается надежность элементов и технических систем автомобилей при их проектировании?

Система технического обслуживания и ремонта машин

8.1. Системы технического обслуживания и ремонта машин, их сущность, содержание и принципы построения

Основными мероприятиями, оказывающими влияние на поддержание и восстановление надежности машин в процессе эксплуатации, являются их техническое обслуживание (ТО) и ремонт (Р).

Техническое обслуживание и ремонт — это те этапы эксплуатации машины, когда она восстанавливает утраченные свойства, поэтому от того, как построена общая стратегия ремонтных воздействий и какие принципы заложены в систему ТО и Р машины, во многом зависит эффективность ее использования.

Потеря машиной работоспособности при эксплуатации — неотвратимый процесс, протекающий в зависимости от конструкции машины и условий ее использования с большей или меньшей интенсивностью.

Восстановление утраченной работоспособности машины достигается путем ремонта узлов и элементов машины, заменой износившихся частей запасными, регулировкой механизмов и другими методами, которые называют ремонтом. Кроме того, применяют ТО, которое в основном направлено на замедление процесса потери машиной работоспособности (замена и пополнение смазочного материала, очистка машины, регулирование механизмов, профилактические мероприятия) и на оценку реального состояния машины (осмотр, диагностика, проверка, испытание, контроль). Во время ТО также проводят небольшой ремонт.

Совокупность машин, средств ТО и Р, исполнителей и устанавливающей правила их взаимодействия документации образуют **систему ТО и Р (СТО и Р)**, которая входит в качестве подсистемы в систему технической эксплуатации.

При периодической системе ремонта машину ремонтируют или осуществляют профилактические и контрольные мероприятия заранее, т. е. до возможного наступления отказа.

Поскольку объем и содержание отдельных периодических ремонтов неодинаковы, их подразделяют обычно на текущие (ма-

лые, профилактические), средние и капитальные. Кроме того, предусматривают ТО (периодическое или по потребности), которое также обычно включает в себя некоторый объем ремонтных работ. При нарушении условий эксплуатации или по другим причинам в реальной обстановке может возникнуть потребность в аварийном ремонте.

Классификация видов ремонта и ТО приведена на рис. 8.1.

Выбор рациональных параметров ремонтной системы является основой для обеспечения надежности при эксплуатации машины.

Рассмотренная стратегия проведения ремонтных и профилактических работ является основой для широко применяемой в промышленности системы периодических планово-предупредительных ремонтов (системы ППР). В зависимости от условий эксплуатации и конструкции машин назначается последовательность их ТО и Р (структура ремонтного цикла), устанавливается длительность межремонтного периода T_0 , решается вопрос о целесообразности проведения капитального ремонта для полного восстановления работоспособности машины, а в некоторых случаях и для ее модернизации.

Профилактические системы ТО и Р предусматривают проведение ТО и Р в плановом порядке — по достижении машиной определенной наработки или по техническому состоянию.

Система ТО и Р машин по наработке предусматривает проведение управляющих воздействий в плановом порядке с установленной периодичностью (по часам наработки). Периодичность проведения ТО и Р устанавливается таким образом, чтобы предупредить возможность возникновения отказа.



Рис. 8.1. Классификация видов ремонта и технического обслуживания

Наряду с достоинствами относительной простоты, четкостью организации работы эксплуатационных служб, возможностью планирования и строгого учета данная система имеет и недостатки. При проведении профилактических управляющих воздействий в плановом порядке по наработке не учитывают фактического состояния машины в целом и отдельных сборочных единиц. Из-за разницы в ресурсе и наработке на отказ, существующей у различных элементов машины, профилактическое проведение ТО и Р по плановой наработке неминуемо ведет к осуществлению ненужных мероприятий по ТО и Р, неоправданных фактическим техническим состоянием машины. Плановая замена агрегатов и ремонтных комплектов ведет к тому, что ресурс, заложенный в конструкции машины, реализуется иногда лишь на 40...60 %. Ненужные обслуживания и большой остаточный ресурс заменяемых элементов в значительной степени снижают эффективность технической эксплуатации.

В практике эксплуатации автомобильного транспорта в России до начала 1990-х гг. данная система ТО и Р являлась наиболее распространенной. Однако эта система достаточно слабо обеспечивает взаимодействие между технической эксплуатацией и изменением технического состояния машин.

Назначенная периодичность ремонта машины T_0 в основном определяет содержание ремонтных работ, так как в зависимости от срока службы каждого элемента конструкции (детали сопряжения или узла) он будет включаться в соответствующий периодический ремонт. Однако решение о включении данного элемента в тот или иной ремонт осложняется тем, что имеет место рассеивание сроков службы, которое приводит либо к недоиспользованию потенциальной долговечности конструкции, либо к возрастанию вероятности отказа в последующий межремонтный период.

На рис. 8.2 приведена схема, поясняющая, какое решение о ремонте данного элемента машины можно принять, если известен закон распределения его срока службы (наработки) до отказа.

Средний срок службы элемента превышает время осуществления n -го ремонта ($T_{ср}$ больше nT_0), однако дисперсия такова, что имеется вероятность отказа α до наступления n -го периодического ремонта. Поэтому могут применяться различные варианты осуществления ремонта данного элемента (например, детали) машины, которые выбираются в зависимости от требований надежности и степени развития ремонтной системы [21].

Вариант 1. Ремонт данной детали (или узла) осуществляется при n -м периодическом ремонте через nT_0 часов работы изделия. При этом, поскольку имеется вероятность α отказа детали до наступления n -го ремонта, то в отдельных случаях деталь ремонтируется или заменяется при межремонтном обслуживании. Такой вариант

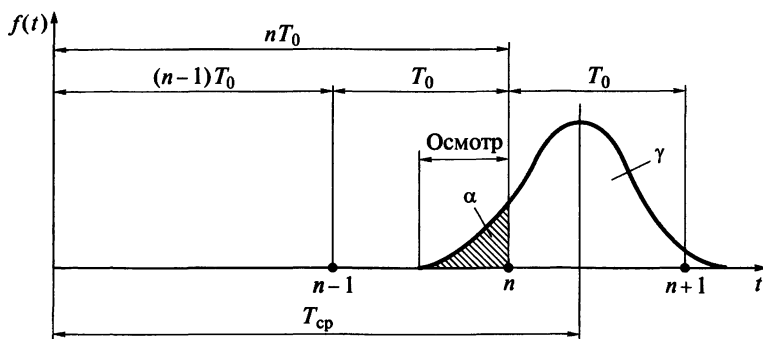


Рис. 8.2. Влияние рассеивания сроков службы на содержание периодических ремонтов:

n — номер периодического ремонта; $T_{\text{ср}}$ — средний срок службы элемента; nT_0 — время осуществления n -го ремонта; T_0 — назначенная периодичность ремонта машины; α — вероятность отказа до наступления n -го периодического ремонта; γ — вероятность безотказной работы

обычно целесообразен, если вероятность α невелика, а отказ в межремонтный период не приводит к недопустимым последствиям.

Вариант 2. Для обеспечения высокой безотказности изделия и недопущения возникновения отказа во время функционирования машины ремонт данной детали (узла) осуществляется при $(n - 1)$ периодическом ремонте. Однако это приводит к значительному недоиспользованию долговечности детали, так как $T_{\text{ср}}$ значительно больше, чем $(n - 1)T_0$.

Вариант 3. Ремонт детали осуществляется при n -м ремонте, однако при предыдущем $(n - 1)$ ремонте проводится диагностика узла или контроль степени повреждения данной детали и дается заключение о возможности безотказной работы машины в течение последующего межремонтного периода. Данную процедуру можно осуществлять также во время специально запланированного осмотра «О».

Данный вариант обеспечивает наибольшее использование потенциального срока службы детали с одновременной гарантией высокой безотказности работы изделия.

Однако он требует дополнительных затрат времени и средств на диагностику, знания основных причин потери деталью работоспособности и наличия методов обнаружения и оценки степени повреждения детали.

Таким образом, применение рациональных методов эксплуатации машины связано со степенью развития системы ремонта и технического обслуживания. Если система не обеспечивает проведение диагностических и контрольных процедур, если нет данных о потенциальной долговечности основных элементов машины и с

позиции надежности она представляет собой «черный ящик», то обеспечение ее безотказности в процессе эксплуатации может быть достигнуто, в основном, за счет значительного недоиспользования сроков службы деталей и узлов (вариант 2), т.е. с повышенными затратами времени и средств на ТО и Р.

8.2. Требования, предъявляемые к системе технического обслуживания и ремонта, и методы определения периодичности их проведения

К системе ТО и Р машин предъявляются следующие требования:

- обеспечение заданных уровней эксплуатационной надежности машинного парка при рациональных материальных и трудовых затратах;
- планово-нормативный характер системы, позволяющий планировать и организовывать ТО и Р на всех уровнях;
- обязательность проведения ТО и Р для всех организаций и предприятий, эксплуатирующих машины, вне зависимости от их ведомственной принадлежности и форм собственности;
- конкретность, доступность и пригодность системы для руководства и принятия решений всеми звеньями инженерно-технической службы;
- стабильность основных принципов и гибкость конкретных нормативов, учитывающих изменение условий эксплуатации, конструкции, качества и надежности машин;
- учет разнообразия условий эксплуатации машин.

Передовые фирмы уделяют первостепенное внимание созданию таких систем ТО и Р, которые в наибольшей степени отвечают реальной потребности машины в восстановлении ее работоспособности и являются источником информации для определения основных направлений по повышению надежности машин данного назначения.

При разработке рациональной системы ТО и Р в ее основу должны быть положены следующие принципы.

1. Система ТО и Р должна быть частью (подсистемой) глобальной системы управления качеством и надежностью выпускаемой продукции. Многие данные, полученные и используемые при функционировании этой глобальной системы, непосредственно необходимы для организации рационального ТО и Р, например сведения о сроках службы основных элементов машины, данные о точности их изготовления, результаты программных испытаний машины, сведения об эксплуатационных наблюдениях о работе прототипов машины и изделий аналогичного назначения и другая информация.

Компьютерное обеспечение и база данных могут быть общими для системы управления качеством и надежностью и для подсистемы управления ТО и Р.

2. Система ТО и Р должна обладать широкими возможностями для диагностирования и определения фактического состояния машины за счет применения специальных автоматизированных систем контроля и диагностики, создания экспертных систем и систем поиска неисправностей, использования информации от устройств машины, осуществляющих контроль ее параметров и непрерывное слежение (мониторинг) за техническим состоянием.

Методы установления потребности в ремонте данного узла или элемента машины открывают возможность проведения ремонта по техническому состоянию машины, когда объемы и содержание ремонтных работ каждый раз устанавливаются в соответствии с действительными потребностями в их осуществлении.

3. Структура ремонтного цикла должна быть заранее установлена для машины данного типа и отражать ее конструктивные особенности и условия использования.

Периодичность ремонтов, длительность межремонтного периода и объем отдельных ремонтов должны устанавливаться из условия обеспечения требуемого уровня безотказности работы машины при минимальных суммарных затратах времени и средств, идущих на ТО и Р машины.

4. На результативность «службы ремонта» влияют также организация труда, технический уровень ремонтных средств, человеческий фактор, уровень качества ремонтируемых машин, наличие развитых информационных систем и другие факторы.

Одним из глобальных вопросов организации ремонтных работ является распределение этих функций между производителем машин данного назначения, потребителем и специальными сервисными подразделениями. От рационального решения этих задач непосредственно зависит и престиж фирмы.

Современные технические возможности позволяют осуществить ремонт и восстановить утраченную работоспособность для любых отказов машины (кроме особых случаев, например, при полном разрушении изделия в результате катастрофы). Вопрос может идти лишь о больших или меньших затратах времени и средств.

5. Большое значение для организации рациональной системы ТО и Р имеет достоверная информация о расчетных (прогнозируемых) сроках службы основных элементов и выходных параметров, их дисперсии и влиянии отдельных отказов на работоспособность машины, а также фактические данные о долговечности стандартных и унифицированных узлов и деталей, о состоянии машин данного типа, уже прошедших ремонт.

Чем достовернее сведения о трансформации выходных параметров машины и о сроках службы отдельных элементов и узлов,

тем большие возможности имеются для использования надежности, заложенной при конструировании машины.

Система ТО и Р должна в максимальной степени отвечать реальной потребности машины в восстановлении утрачиваемой работоспособности.

Говоря о принципах построения систем ТО и Р, следует остановиться на определяющем вопросе **оптимизации периодичностей контролей работоспособности, технических обслуживаний и ремонтов машин.**

Периодичность контроля работоспособности и ТО — это наработка между двумя последовательно проводимыми однородными работами по контролю или ТО.

Наиболее распространенными методами определения периодичности ТО являются:

- А — по допустимому уровню безотказности;
- Б — по допустимому значению и закономерности изменения параметра технического состояния;
- В — технико-экономический, экономико-вероятностный;
- Г — метод статистических испытаний.

Метод определения периодичности ТО по допустимому уровню безотказности основан на выборе такой рациональной периодичности, при которой вероятность отказа F элемента не превышает заранее заданной величины (рис. 8.3). Учитывая, что вероятность отказа F есть величина, обратная вероятности P безотказной работы элемента, то можно записать уравнение вероятности безопасной работы

$$P_d \{T_0 \geq t_i\} \geq R_d = \gamma, \quad (8.1)$$

где P_d — допустимая вероятность безотказной работы; T_0 — наработка на отказ; t_i — периодичность ТО (контроля работоспособности); R_d — допустимая вероятность безопасной работы; γ — величина гамма-процентного ресурса.

Как правило, допустимую вероятность безотказной работы устанавливают исходя из величины гамма-процентного ресурса. По этому методу периодичности ТО $t_i \leq t_\gamma$.

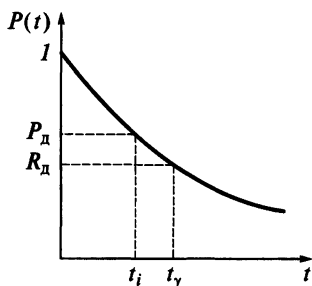


Рис. 8.3. Определение периодичности технического обслуживания по допустимому уровню безотказности:

R_d — допустимая вероятность безотказной работы; t_i — периодичность проведения технического обслуживания (контроля работоспособности)

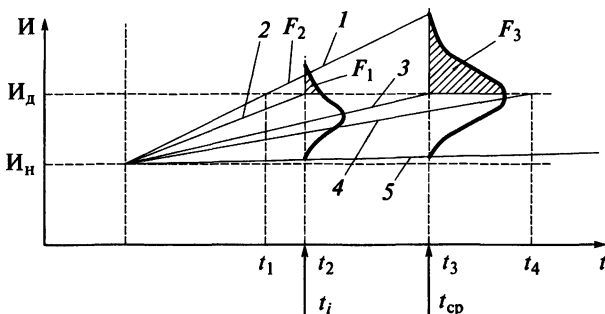


Рис. 8.4. Определение периодичности технического обслуживания по допустимому значению закономерности изменения параметров технического состояния:

1—5 — изменение определенного параметра технического состояния машин в зависимости от факторов, действующих на машину; I — значение параметра; I_d — допустимое значение параметра; I_n — номинальное значение параметра; t — наработка; F — вероятность отказа

Для агрегатов и механизмов, обеспечивающих безопасность, $R_d = 0,9 \dots 0,98$, для прочих узлов и агрегатов $R_d = 0,85 \dots 0,9$.

Определенная таким образом периодичность значительно меньше средней наработки на отказ.

Метод определения периодичности ТО по допустимому значению и закономерности изменения параметра технического состояния. Изменение определенного параметра технического состояния машин происходит по-разному, в зависимости от факторов, действующих на машину (рис. 8.4, кривые 1, 2, 4, 5).

В среднем для этой группы тенденция изменения параметра характеризуется кривой 3, по ней и допустимому значению параметра I_d можно определить среднюю наработку t_{cp} , когда в среднем вся совокупность изделий достигает допустимого значения параметра технического состояния. Этой средней наработке соответствует средняя интенсивность изменения параметра α_{cp} . При этом те изделия, у которых интенсивность изменения параметра технического состояния выше средней (кривые 1 и 2), т.е. $\alpha_i > \alpha_{cp}$, достигают предельного состояния значительно раньше при наработках t_1 и t_2 , меньших t_{cp} . Следовательно, для этих изделий при назначенной периодичности t_{cp} с вероятностью F_3 примерно 0,5 будет зафиксирован отказ. Подобная система является нерациональной. Поэтому назначают такую периодичность t_1 , меньшую, чем t_{cp} , при которой вероятность отказа не будет превышать заданной величины риска F , например F равно F_2 .

Этот метод применяют для объектов с явно фиксируемым изменением параметра технического состояния. К ним относится большинство изнашиваемых узлов, механизмов и соединений,

техническое состояние которых поддерживается с помощью регулировочных работ (тормоза, клапанный механизм и др.). Рациональная периодичность ТО в этом случае в 1,5—2 раза ниже средней периодичности.

Технико-экономический метод сводится к определению суммарных затрат на ТО и Р и их минимизации. Минимальным затратам соответствует оптимальная периодичность ТО t_1 . Удельные затраты на ТО определяются следующим образом:

$$C_1 = d/t_{\text{ТО}}, \quad (8.2)$$

где d — стоимость выполнения операции ТО; $t_{\text{ТО}}$ — периодичность ТО.

При увеличении периодичности разовые затраты на ТО d остаются постоянными или незначительно возрастают, что приводит к снижению удельных затрат C_1 (рис. 8.5).

Удельные затраты на ремонт

$$C_2 = C/t_p, \quad (8.3)$$

где C — стоимость ремонта; t_p — периодичность ремонта.

Увеличение периодичности ТО ведет к росту удельных затрат C_2 .

Суммарные затраты на ТО и Р являются целевой функцией, минимальное значение которой соответствует оптимальному решению

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 \rightarrow \min. \quad (8.4)$$

Определение минимума целевой функции и оптимального значения периодичности ТО производится графически (см. рис. 8.5) или аналитически, в том случае, если известны зависимости $C_1 = f(t_{\text{ТО}})$, $C_2 = f(t_p)$.

Экономико-вероятностный метод обобщает предыдущие и учитывает экономические и вероятностные факторы и позволяет рассчитать рациональную периодичность ТО и Р исходя из заданного сокращения потока отказов в межосмотровые периоды.

Метод статистических испытаний основан на имитации (моделировании) реальных случайных процессов ТО и Р, что дает возможность ускорить испытания, исключить влияние побочных фак-

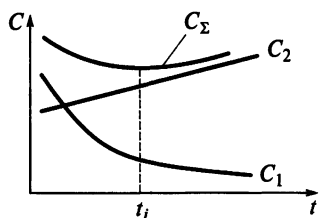


Рис. 8.5. Определение периодичности технического обслуживания технико-экономическим методом:

C_1 — удельные затраты на техническое обслуживание; C_2 — удельные затраты на ремонт; C_{Σ} — суммарные затраты на техническое обслуживание и ремонт; t — наработка

торов, сократить стоимость экспериментов. Моделирование производится с помощью ЭВМ.

Техническое обслуживание включает в себя 8—10 видов работ (смазочные, крепежные, регулировочные, контрольные и т.д.), 150—300 и более конкретных объектов обслуживания, т.е. агрегатов, механизмов и деталей, требующих предупредительных воздействий.

Каждый узел, механизм, соединение может иметь свою оптимальную периодичность, определенную методом, изложенным ранее. Если следовать таким периодичностям, то машина должна практически непрерывно направляться для ТО каждого соединения, механизма, агрегата, что вызовет большие сложности с организацией работ и дополнительные потери рабочего времени.

Поэтому после выделения из всей совокупности воздействий тех, которые должны выполняться при ТО и определении оптимальной периодичности каждой операции, производят группировку операций в виды ТО. Это дает возможность уменьшить число заездов машины на ТО и время простоев в ТО и Р. Однако нужно иметь в виду, что группировка операций неизбежно связана с отклонением периодичности ТО данного вида от оптимальной периодичности ТО отдельных операций. При определении «групповой» периодичности применяют технико-экономический (Е) и экономико-вероятностный (Ж) методы.

При технико-экономическом методе определяют такую групповую периодичность $t_{\text{ТО}}$, которая соответствует минимальным затратам на ТО и Р по всем рассматриваемым объектам $C_{\Sigma \min}$ (рис. 8.6).

При этом методе оптимальная периодичность $t_{\text{ТО}}$ соответствует минимальному значению целевой функции

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^s C_{1i} + \sum_{i=1}^s C_{2i} \rightarrow \min, \quad (8.5)$$

где C_{1i} — удельные затраты на ТО i -го объекта; C_{2i} — удельные затраты на Р i -го объекта; s — число операций в группе (виде ТО).

Группировка по стержневым операциям ТО основана на том, что выполнение группы операций ТО приурочивается к оптимальной периодичности стержневых операций, которые должны обладать следующими признаками:

- 1) влияют на безопасность;
- 2) невыполнение их снижает безотказность, экономичность и влияет на работоспособность машины;
- 3) характеризуются большой трудоемкостью, требуют специального оборудования и обустройства поста;
- 4) регулярно повторяются.

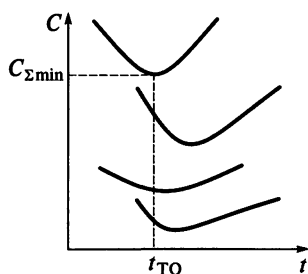


Рис. 8.6. Группировка периодичности технического обслуживания технико-экономическим методом:

$C_{\Sigma \min}$ — минимальные затраты на техническое обслуживание и ремонт по всем рассматриваемым объектам; t — наработка

Примерами подобных стержневых операций или групп операций являются смазывание деталей и узлов машины через пресс-масленки (признаки 3, 4); регулирование тормозной системы (признаки 1, 2, 3, 4), смена масла в картере двигателя (признаки 3, 4).

Таким образом, периодичность стержневых операций принимается за периодичность вида ТО.

Экономико-вероятностный метод позволяет определить целесообразность выполнения данной операции не с оптимальной для нее, а с заданной периодичностью стержневой операции. В этом случае определяется зона наработок, в которой удельные затраты при предупредительной стратегии остаются ниже, чем при устранении возникшего отказа. Если в этой зоне находится периодичность стержневой операции, то изменение периодичности данной операции допустимо.

Если ряд объектов обслуживания имеет весьма близкие периодичности, то используется естественная группировка. Например, вся совокупность несомоконтрающихся крепежных соединений современных машин обнаруживает два пика потребности в возобновлении предварительной затяжки: в интервалах 2...5 и 10...14 тыс. км пробега или 600...1500 и 3000...5000 ч наработки. Достаточно близкую периодичность необходимости регулирования обнаруживают тормозные механизмы (10...12 тыс. км пробега или 3...4 тыс. ч наработки), клапанные механизмы (9...14 тыс. км пробега или 3...5 тыс. ч наработки).

Ранее отмечалось, что больше половины всех видов отказов в автомобилях составляют износые. Детали машин имеют различные скорости изнашивания, что объясняется их свойствами, условиями смазывания, абразивностью рабочей среды и т.д. Даже в одной и той же машине интенсивность изнашивания деталей наблюдается различной.

Проведенные в НИИАТ исследования показали, что наибольший прирост эффективности происходит при переходе от стратегии устранения отказов по потребности к предупредительной стратегии с двумя-тремя видами ТО. При этом суммарные удельные затраты на ТО и Р сокращаются на 30...40 %. При увеличении числа видов ТО до 5 непосредственные затраты на ТО и Р практи-

чески стабилизируются, а дополнительные затраты, связанные с планированием и постановкой машины на ТО, возрастают.

При этом совершенно очевидно, что одна и та же деталь в различных условиях эксплуатации будет иметь различную реализацию закона изменения изнашивания, что требует индивидуального подхода к оценке технического состояния машины на основе диагностирования.

8.3. Функционирование машины в экстремальных ситуациях

При эксплуатации машины внешние воздействия на нее, значительно превышающие уровень, установленный ТУ, могут привести к аварии, а в отдельных случаях и к катастрофе.

Экстремальные ситуации могут возникнуть и вследствие несовершенства конструкции машины или из-за неправильных методов ее использования (влияние человеческого фактора) [28].

Весь комплекс вопросов, связанный с возможностью возникновения аварий и катастроф и с разработкой методов борьбы с их последствиями, включается обычно в проблему безопасности.

Высокая надежность машины — одно из основных условий обеспечения ее безопасности, под которой следует понимать свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды [1].

Причины возникновения экстремальных ситуаций, связанные с внешними воздействиями на машину, могут быть следствием попадания машины в зону высоких или низких температур, радиационных воздействий, геологических явлений и других, как правило, редких событий. Обычно для каждого объекта существует присущий ему комплекс возможных аварийных ситуаций, который должен быть изучен для оценки последствий экстремальных воздействий на машину.

Внешние воздействия могут и не быть экстремальными, а лишь несколько превышать уровень, установленный ТУ, или они могут быть не учтены при проектировании машины. В этом случае изделие будет быстрее терять свою работоспособность, чем это предусмотрено.

Так, повышенная влажность среды, колебания температуры, загрязненность атмосферы, ветер, акустический шум, солнечная радиация, плесень, бактерии, насекомые — вот неполный перечень тех факторов, которые приходится учитывать при оценке возможности отказа изделия в различных условиях эксплуатации.

Чем большие воздействия оказывает на машину среда, тем выше вероятность отказа, которая резко возрастает при работе изделия в не свойственной ему обстановке.

Поэтому при возникновении преждевременных отказов, особенно при тяжелых последствиях, часто создается конфликтная ситуация между конструкторами, технологами и эксплуатационниками. Некоторые причины преждевременных отказов приведены в табл. 8.1 [21].

Последняя причина допустима лишь в том случае, если последствия отказа незначительны и могут быть устранены при межремонтном обслуживании. Если же преждевременный отказ может привести к тяжелым последствиям и, тем более, стать причиной аварийной ситуации, то он является недопустимым и возникает по вине конструктора изделия. Поэтому на стадии проектирования необходимо:

- проанализировать возможность возникновения аварийных ситуаций, рассмотреть и описать сценарии их развития, классифицировать возможные последствия аварии, установить «индекс опасности» (вероятность получения объекта данной степени поражения);

- установить выходные параметры машины, которые претерпевают существенные изменения в процессе аварии. Выявить те показатели, изменение которых предшествует критическому состоянию и по значению которых можно прогнозировать возможность аварии;

- установить потенциально опасные узлы и агрегаты машины, нарушение работоспособности которых может иметь недопустимые последствия, например заклинивание механизма, течь топливной системы, нарушение герметичности, потеря давления в гидросистеме, деформация системы;

- установить предельно допустимые условия эксплуатации и режимы работы машины. Оценить возможную продолжительность работы машины в экстремальных условиях, в том числе при потере работоспособности отдельных узлов и агрегатов машины.

Таблица 8.1

Причины преждевременных отказов

Причина преждевременного отказа	Кто виноват в возникновении отказа
Неправильный расчет ресурса изделия. Неправильно установлены ТУ на параметры изделия	Конструктор
Нарушение ТУ при изготовлении и испытании изделия	Технолог
Нарушение режимов и условий эксплуатации	Эксплуатационник
Допускаемая ТУ вероятность возникновения отказа	Никто

Методы обеспечения безопасности машин разнообразны, но могут быть сведены к двум основным направлениям.

Первое направление связано с созданием машин, имеющих запас прочности и надежности тех элементов конструкции, которые могут стать причиной возникновения экстремальной ситуации.

В первую очередь необходимо рассмотреть те элементы, после отказа которых может произойти резкое изменение их состояния из-за лавинообразного развития процесса повреждения.

Примером может служить образование и развитие усталостных трещин в металлических конструкциях, повышенный износ зеркала цилиндра и шеек коленчатого вала и т. п.

Другой пример — процесс схватывания в узлах трения машины, который представляет существенную опасность, так как в результате заклинивания механизма может произойти авария. Условия контакта, материалы и смазка в паре трения не должны допускать схватывания, но если оно произошло (например, из-за прекращения подачи смазочного материала), то пара трения должна некоторое время функционировать пусть даже с худшими трибологическими характеристиками.

Таким образом, требования безопасности накладывают дополнительные условия на материалы и конструкцию, которые должны обеспечивать функционирование изделия в экстремальных ситуациях.

Контрольные вопросы

1. Какие основные мероприятия оказывают влияние на поддержание и восстановление надежности машин в процессе эксплуатации?
2. Что образует систему ТО и Р автомобилей?
3. Как классифицируют виды ТО и Р автомобилей?
4. Какие требования предъявляют к системе ТО и Р?
5. Как влияет на надежность функционирование машины в экстремальных ситуациях?
6. Каковы причины преждевременных отказов машин?

Диагностирование как метод контроля и обеспечения надежности автомобиля при эксплуатации

9.1. Общие сведения о диагностике

Диагностика — от греч. *diagnosticos* — способный распознавать. В медицине диагностика изучает признаки болезней и устанавливает методы, с помощью которых дается заключение о характере и существе заболевания. Диагностика технического состояния автомобилей изучает и устанавливает связь скрытых параметров их состояний с внешними признаками протекающих процессов, разрабатывает методы и средства распознавания и анализа этих признаков для определения состояния каждого автомобиля (или его элементов) в данный период времени. Кроме того, она прогнозирует ресурс исправной работы диагностируемого автомобиля и каждого его элемента в отдельности.

Для проведения процесса диагностики тех или иных элементов автомобиля допускается снятие их с автомобиля и установка на специальные стенды или устройства, которые позволяют в определенной мере имитировать (воспроизводить) такие же режимы, которые имеют место в обычных условиях эксплуатации.

Теория и методы диагностики технического состояния автомобилей получают все большее развитие в связи с их возрастающей актуальностью.

Теория надежности и техническая диагностика — разные и в то же время тесно связанные между собой науки. Теория надежности не разрабатывает методов и средств поиска неисправностей в данном объекте. Она располагает методами, позволяющими определять (на основе анализа статистической информации) вероятность возникновения отказов в совокупности одинаковых объектов. Техническая диагностика располагает методами, с помощью которых можно оценить состояние конкретного объекта. Вместе с тем многие задачи диагностики решаются на основе теории надежности.

Основной целью технической диагностики является разработка методов и средств получения такой информации об объекте,

чтобы можно было определить его состояние и прогнозировать ресурс безотказной работы. Что же представляет собой процесс диагностики состояния автомобиля?

Этот процесс состоит из следующих действий:

- измерение значений параметров, принятых за признаки неисправностей;
- формирование диагноза по результатам измерений и на основании диагностической логики;
- прогнозирование ресурсов работоспособного состояния автомобиля или отдельных его элементов.

Измерение диагностических параметров осуществляется специальными приборами. При этом автомобилю (или его элементам) задаются определенные скоростные и нагрузочные режимы. Они должны быть по возможности близкими к эксплуатационным режимам. Измеряются те диагностические параметры, которые несут наибольшую информацию о состоянии конкретного элемента.

Основные задачи технического диагностирования:

- проверка исправности (работоспособности) машин или их составных частей с высокой достоверностью;
- поиск дефектов с установленной глубиной поиска;
- сбор исходных данных для прогнозирования остаточного ресурса составных элементов;
- выдача рекомендаций по результатам диагностирования о виде, объеме, месте и сроке ремонтно-обслуживающих работ.

На рис. 9.1 показано место диагностирования в техническом сервисе.

Известно, чем сложнее объект, тем ниже уровень его надежности: каждая деталь имеет потенциальную возможность выйти из строя. Сложный объект всегда имеет несколько состояний. Отклонения реального объекта от идеального по ряду свойств называются его *состояниями*. В процессе эксплуатации состояния не остаются постоянными. Каждому периоду времени соответствует множество разных состояний. Каждое из них вызывает свои выходные процессы: увеличенный зазор (стуки), прогиб вала (бие) и т.д. Значит эти процессы характеризуются выходными параметрами (сигналами). Если сигналы обозначить через X_1, X_2, \dots, X_n , а возможные состояния объекта через Y_1, Y_2, \dots, Y_n , то задачу диагностики объекта можно математически выразить в виде системы уравнений

$$\begin{aligned} X_1 &= f_1(Y_1, Y_2, \dots, Y_n); \\ X_2 &= f_2(Y_1, Y_2, \dots, Y_n); \\ &\dots\dots\dots \\ X_n &= f_n(Y_1, Y_2, \dots, Y_n), \end{aligned} \tag{9.1}$$

где каждый параметр сигнала X_i является функцией состояния Y_i .



Рис. 9.1. Место диагностирования в техническом сервисе

Для удобства множество возможных состояний можно сгруппировать в два основных вида: исправное и неисправное.

Формирование диагноза о состоянии объекта основано на анализе (с помощью диагностической логики) полученной информации. При этом устанавливается состояние по принятой классификации.

Отказы принято квалифицировать по следующим признакам:

а) по природе возникновения — постепенные (износосые) и внезапные;

б) по значимости для функции объекта — существенные (когда утрачивается работоспособность) и несущественные;

в) по месту возникновения — дорожные (вызывающие простои автомобилей в рабочее время на линии) и заявочные (устраняемые по заявкам в нерабочее время).

Установлены закономерности возникновения отказов. Постепенные отказы подчиняются нормальному закону распределения (Гаусса). Внезапные (вызванные превышением предельных напряжений) — экспоненциальному закону. Наконец, распределение отказов из-за старения материалов деталей подчиняется закону Вейбулла. Таким образом, прогнозируя возникновение износосовых (постепенных) отказов, можно их не допустить, если своевременно провести профилактические воздействия: регулировки, предупредительные замены деталей и т.п.

9.2. Основные понятия и терминология технической диагностики

Диагностика состояния автомобилей имеет сравнительно небольшой период научного развития. В специальной и учебной литературе встречаются неодинаковые термины одних и тех же понятий.

Диагностика технического состояния автомобилей — отрасль науки, изучающая и устанавливающая признаки неисправного состояния, методы, принципы и оборудование, при помощи которых дается заключение о техническом состоянии системы без разборки (по принятой классификации) и прогнозирование ресурса ее исправной работы.

Диагностирование — процесс постановки диагноза, один из видов технического воздействия, направленного на поддержание автомобиля в исправном состоянии.

Техническое диагностирование (ТД) — процесс контроля и прогнозирования технического состояния объекта диагностирования [9].

Техническое состояние (ТС) — совокупность признаков (параметров), характеризующих изменение свойств объекта в процессе эксплуатации (а также испытаний после изготовления или ремонта), установленных НТД.

Техническое состояние подразделяется на следующие виды:

- исправное (объект соответствует всем требованиям, установленным НТД);
- неисправное (объект не соответствует хотя бы одному из требований НТД);
- работоспособное (выполнение всех заданных функций);
- неработоспособное (одна из заданных функций не выполняется).

В теории диагностики принято, что объект имеет множество состояний (классов состояний). Однако можно полагать, что объект имеет ограниченное число классов состояния, если они будут связаны с определенным объемом работ по контролю ТС, проведению ТО и их периодичности.

Контроль ТС — процедура ТД, включающая в себя определение вида ТС объекта и поиск места и причин неисправности.

Контроль ТС осуществляется периодически или непрерывно.

Прогнозирование ТС — определение вида ТС объекта или параметров, характеризующих ТС с некоторой (иногда заданной) вероятностью на предстоящий интервал времени (ресурс), или установление интервала времени с определенной вероятностью, в течение которой сохраняется работоспособность объекта или наступит отказ.

Виды неисправностей — повреждения, нарушения функционирования и дефекты. *Повреждения* относятся к нарушению исправного состояния в эксплуатации, *неправильное функционирование* — нарушение алгоритмов функционирования в эксплуатации и при изготовлении. *Дефект* относится к определению качества изготовления.

Дефектация при ревизии после постройки или ремонта — поиск дефекта, перед ремонтом — поиск повреждений. В ряде руководств по диагностике понятие «неисправность» отождествляется с понятием «дефект».

Диагноз — результат контроля ТС — заключается в установлении определенной неисправности в объекте диагностирования или отнесении объекта к определенной категории (классу) технического состояния.

Диагностический параметр (признак) — параметр (признак) объекта, количественно или качественно характеризующий ТС объекта (как правило, совокупность параметров).

Диагностические параметры имеют следующие градации: номинальный, предельно допустимый, предельно возможный и аварийный.

Контролепригодность (диагностируемость) — приспособленность объекта диагностирования к измерению диагностических признаков (параметров) средствами диагностирования.

Средство диагностирования — аппаратура и программы, с помощью которых осуществляется диагностирование.

Система диагностирования — совокупность средства (средств) диагностирования и распознающего устройства, классифицирующего принадлежность параметров (признаков) определенному классу состояния объекта диагностирования. Различают следующие виды систем диагностирования:

- в зависимости от участия человека в определении и классификации параметров диагностирования — ручные, автоматизированные и автоматические;

- по расположению — встроенные (полностью встроенные в объект диагностирования или имеющие встроенные в объект диагностирования преобразователи, в том числе периодически подключаемые к объекту, и стационарно установленное внешнее измерительное устройство) или внешние (переносные);

- по охвату типов объектов — специализированные и универсальные;

- по охвату элементов объекта — локальные и общие.

Виды ТД определяются порядком его осуществления:

- функциональное, осуществляемое во время функционирования объекта, на которое поступают только рабочие воздействия (к нему относят также анализ выходящих из объекта сред — анализ проб в специализированных лабораториях);

• тестовое, осуществляемое путем подачи на объект тестового воздействия, и том числе неразрушающий контроль без разборки или с частичной разборкой объекта диагностирования.

Алгоритм диагностирования — совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении ТД.

Система — упорядоченная совокупность совместно действующих объектов, предназначенная для выполнения заданных функций. В качестве системы можно рассматривать автомобиль, агрегат, узел.

Элемент — объект, входящий в систему и выполняющий в ней заданные функции.

Структура системы — определенная взаимосвязь (взаиморасположение) составных частей (элементов), характеризующая устройство (конструкцию) системы.

Параметр — качественная мера, характеризующая свойство системы, элемента или явления, в частности, процесса. Параметр, используемый при диагностировании, называется диагностическим.

Значение параметра — количественная мера параметра.

Структурный параметр — качественная мера, характеризующая свойство структуры или ее элемента (геометрическая форма, размеры, взаимное расположение элементов, чистота их поверхности, микроструктура материала и т.д.).

Основной параметр — качественная мера, характеризующая возможность выполнения системой заданных функций.

Второстепенный параметр — качественная мера, характеризующая удобство эксплуатации, внешний вид, техническую эстетику и т.п.

Входной параметр — качественная мера взаимодействия на систему извне (расход и свойства топлива, нагрузка, режим ее приложения, климатические, атмосферные, дорожные и другие условия).

Выходной параметр — качественная мера внешнего проявления (реакции) свойств системы (выходными параметрами двигателя внутреннего сгорания являются мощность и крутящий момент, тепловыделение, газовыделение, шумообразование, радиопомехи и т.д., для тормозной системы — время срабатывания привода, тормозное усилие и тепловыделение).

Предельное значение параметра — показатель, при котором дальнейшая эксплуатация автомобиля (агрегата, узла) недопустима или нецелесообразна по технико-экономическим соображениям.

Диагностический параметр (симптом) — косвенное проявление технического состояния системы, элемента.

Исправное техническое состояние — состояние системы, при которой все ее структурные и выходные параметры находятся в допустимых пределах изменения.

Неисправное техническое состояние — состояние системы, при котором один из основных структурных и выходных параметров вышел за допустимые пределы изменения.

Работоспособное состояние — состояние системы, при котором ее основные структурные и выходные параметры находятся в допустимых пределах изменения.

Отказ автомобиля, агрегата, узла, детали — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния в течение определенного времени, запланированного для выполнения транспортной или специальной работы.

Параметр отказа — качественная мера, характеризующая нарушение работоспособного состояния агрегата, узла, детали.

Значение параметра отказа — количественная мера, характеризующая нарушение работоспособного состояния агрегата, узла, детали.

Прогнозирование — определение сроков службы автомобиля (агрегата, узла, детали) до момента возникновения предельного состояния, заданного уровня вероятности безотказной работы.

Техническая информация об автомобиле — документ, содержащий сведения об автомобиле, его агрегатах и узлах, величинах наработок автомобиля на момент их установки, о выполнении плановых технических обслуживаний и другие данные, необходимые для постановки диагноза.

Диагноз — заключение о техническом состоянии системы, элемента по принятой классификации состояний. Диагноз, формируемый по минимальному числу общих диагностических параметров, называется *экспресс-диагнозом*.

Объективное диагностирование — процесс диагностирования, осуществляемый при помощи контрольно-измерительного оборудования, приборов и инструментов.

Субъективное диагностирование — определение без контрольно-измерительных приборов и инструментов диагностических параметров, поддающихся оценке с помощью органов чувств или с применением отдельных простейших средств для усиления сигналов.

Общее диагностирование — диагностирование автомобиля, агрегата по диагностическим параметрам, характеризующим их общее техническое состояние без выявления конкретной неисправности («исправен» — «неисправен»).

Общее диагностирование может применяться для диагностирования агрегатов, систем и механизмов, обеспечивающих безопасность движения.

Диагностирование поэлементное (углубленное) — диагностирование автомобиля, агрегатов, узлов по диагностическим параметрам, характеризующим их техническое состояние с выявлением места, причины и характера неисправности и отказа.

Контрольно-диагностические средства — оборудование, приборы и инструменты, предназначенные для оценки технического состояния автомобиля и расположенные как в специально предназначенных помещениях, так и в зонах технического обслуживания и ремонта автомобилей. Они могут быть стационарными, передвижными, переносными. Различают контрольно-диагностические станции, пункты, линии и посты.

9.3. Значение диагностики

При эксплуатации автомобилей одной и той же модели даже в сравнительно одинаковых условиях потребность в технических обслуживаниях и текущем ремонте будет у них неодинакова.

Техническая диагностика снижает время простоя машины, обеспечивает значительную экономию средств на ее обслуживание и ремонт. Выполнение только действительно необходимых операций по ремонту и регулированию сокращает расход запасных частей, топлива и смазочных материалов. Так, своевременное обнаружение и устранение значительных неисправностей в системах питания или зажигания двигателя, агрегатов трансмиссии или ходовой части улучшает на 5... 10 % топливно-экономические показатели, увеличивает мощность двигателя, в 2—3 раза улучшает экологические показатели, повышает безопасность эксплуатации машины.

В техническом обслуживании и ремонте автомобильного транспорта нормативы ТО разработаны на основе статистического анализа неисправностей большого парка автомобилей.

Выполнение всего перечня работ, установленных для данного вида ТО, вызывает излишние затраты труда и материальных средств. Только с помощью эффективного контроля можно устанавливать фактическую потребность в тех или иных профилактических операциях и своевременно выявить и предупредить появление неисправностей и отказов автомобиля.

Диагностика позволяет значительно сократить объем контрольных работ и вместе с тем объективно и достаточно точно установить действительную потребность в профилактике определенных агрегатов (механизмов), т.е. реальную необходимость в ремонте.

Для установления причин неисправностей без диагностирования состояния агрегата выполняется его разборка. Частое проведение разборочно-сборочных работ способствует интенсивному износу деталей и снижению надежности и долговечности автомобиля.

Тем самым диагностика способствует экономии запасных частей и эксплуатационных материалов.

Диагностика состояния автомобилей играет большую роль в повышении безопасности их движения. Все еще велико число дорожно-транспортных происшествий (ДТП), возникающих по причине неисправностей систем автомобилей.

Особенно тяжелые последствия имеют те ДТП, которые являются следствием неисправности тормозов, рулевого управления, ходовой части автомобиля и других элементов, влияющих на безопасность движения.

9.4. Диагностические параметры, определение предельных и допустимых значений параметров технического состояния

В прикладном смысле, под термином «диагностика» подразумевают процесс определения технического состояния автомобиля (агрегата, механизма) без его разборки и выдачу информации о необходимом ремонте или профилактике. Безразборную проверку осуществляют по косвенным показателям (люфт, шум, нагрев и т.д.), несущим информацию о скрытых неисправностях механизмов.

Диагностика как процесс исходит из учета идей работы автомобиля (его технической биографии), опирается на данные о его техническом состоянии в настоящий момент и завершается прогнозом ресурса безотказной работы на основе более или менее сложной экстраполяции. Из этого видно, что диагностика включает в себя контроль технического состояния автомобиля, прогноз ресурса его безотказной работы и заключение о необходимых технических воздействиях на механизм.

Контроль состоит в сравнении показателей технического состояния механизма, выраженных диагностическими сигналами, с нормативами. На основании этого выявляют неисправности механизмов.

Прогноз ресурса — это определение возможности пробега автомобиля до очередной диагностики. Задача прогноза ресурса сводится к экстраполяции закономерности изменения работоспособности объекта до достижения им предельного состояния, обусловленного технико-экономической целесообразностью дальнейшего использования. Заключение состоит в определении необходимых воздействий на механизм как ремонтного (по результатам контроля), так и профилактического (по результатам прогноза) характера.

Однако в условиях эксплуатации темп изменения работоспособности любого сложного механизма автомобиля носит случайный характер. То же самое относится и к показателю предельного

состояния, который находят на основе статистической обработки потока отказов аналогичных механизмов. Следовательно, периодичность диагностики определяется на той же статистической основе, что и периодичность профилактических работ планово-предупредительной системы ТО. Это позволяет сделать вывод о том, что применительно к современным условиям работы автотранспортных предприятий диагностика является органической частью технологического процесса планово-предупредительной системы ТО и Р автомобилей.

Если проводимый при диагностике контроль дает возможность уточнить в соответствии с фактической потребностью объема работ, предусмотренных профилактической системой (за исключением смазочных и крепежных операций), то прогноз ресурса позволяет уточнить периодичность профилактики.

Следовательно, диагностика автомобилей является средством индивидуальной корректировки режимов ТО, установленных планово-предупредительной системой. Сказанное, конечно, не исключает возможности самостоятельного существования эпизодической диагностики инспекторского характера, не имеющей непосредственной связи с плановой технической эксплуатацией автомобилей.

9.5. Принципы диагностирования автомобилей

Под **логической структурой** системы технического диагностирования понимаются последовательность и способы решения задач для построения этой системы и проведения собственно диагностирования. Безразлично, к какой системе технического диагностирования будет относиться эта последовательность — к ручной, полуавтоматической, автоматической или просто будет использоваться «диагностическое мышление» в практике технической эксплуатации.

Прежде всего выбирается подход к задаче распознавания — логический (детерминистский) или вероятностный (стохастический). В первом случае необходимо иметь совокупность логических признаков, определенным (детерминированным) образом характеризующие автомобиль. Во втором случае совокупность признаков должна характеризовать состояние автомобиля определенной вероятностью.

Логические признаки распознаваемых классов (подклассов) состояний рассматриваются как элементарные высказывания, принимающие два значения истинности вида «Да» или «Нет» при отнесении к соответствующему классу состояния.

Логические признаки могут быть двух видов — количественные и качественные.

Суть вероятностного метода заключается в том, что для данного объекта известна вероятность появления определенной неисправности при появлении определенного признака. В то же время вероятностная модель позволяет производить распознавание случайных признаков в условиях наличия шумов, ошибок и при недостаточности данных, но требует значительного накопления статистической информации. В диагностике автомобилей преобладает логический (детерминистский) подход.

Построение автомобиля начинается с составления *диагностических моделей*:

- моделей неисправностей (в том числе работоспособности объекта в целом и правильности его функционирования) для оценки состояния и поиска неисправностей;
- моделей развития неисправностей для прогнозирования состояния и определения оставшегося ресурса.

Диагностические модели (модели неисправностей) строятся на базе моделей объектов (автомобилей) и их элементов (т.е. объект диагностирования рассматривается в целом или разбивается на элементы), выбора диагностических параметров и словаря неисправностей. Словарь неисправностей представляет перечень возможных неисправностей и их характеристик.

Далее разрабатывают методы распознавания (решающие правила) в зависимости от возможности их реализации в формальной или неформальной системе распознавания.

На рис. 9.2 показана схема образования диагностических параметров.

Под формальной системой диагностирования понимаются системы, основанные на использовании базы данных, а под неформальной системой — системы, использующие базы данных и базы знаний.

Заключительной фазой разработки формальной системы диагностирования является составление диагностической таблицы (матрицы) — *таблицы неисправностей* с решающими правилами или ориентированного графа.

Диагностические параметры для оценки ТС конструктивных элементов автомобилей в целом могут быть образованы в виде *обобщенного параметра* (комплекса) [8]:

$$\Pi = f(k_i x_i),$$

где f — функция, которая подбирается; k_i — весовые коэффициенты; x_i — контролируемые параметры.

Следует отметить, что обобщенные параметры обладают ограниченной информативностью.

Предельные значения диагностических параметров устанавливаются двумя способами: проведением планируемых эксперимен-

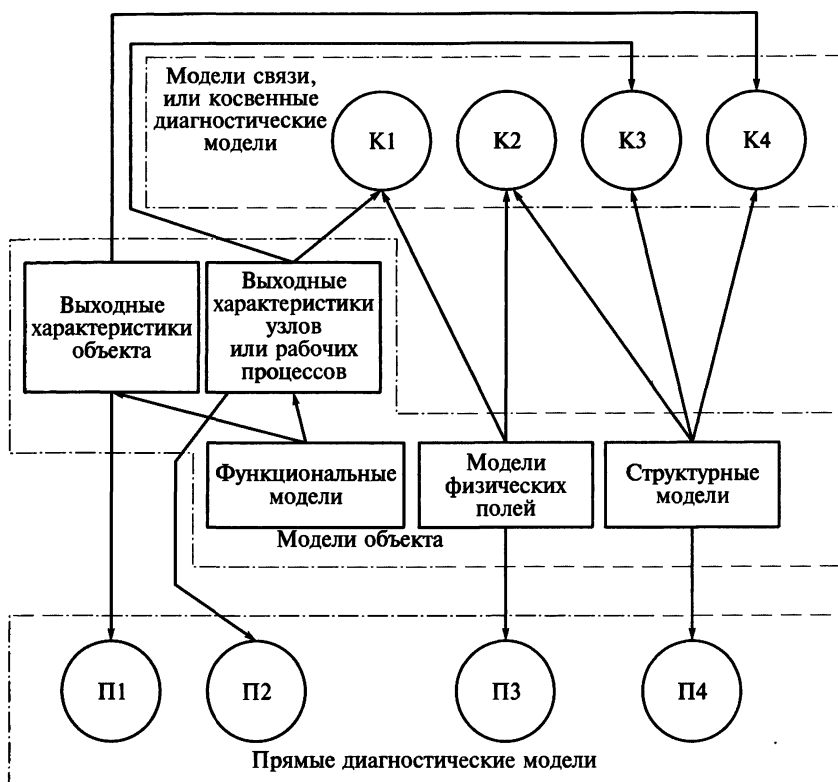


Рис. 9.2. Схема образования диагностических параметров:

К и П — параметры соответственно косвенные и прямые; K1 — характеристики рабочих процессов → физические поля (например, нарушение сгорания → вибрация); K2 — структура → физические поля (например, зазоры в подшипнике → → вибрация); K3 — структура → выходные характеристики (например, мощность → зазоры в ЦПГ двигателя); K4 — структура → рабочие процессы; П1 — выходные характеристики объекта (основные заданные функции); П2 — рабочие процессы (правильность функционирования); П3 — физические поля (например, вибрации двигателя); П4 — непосредственное определение изменения структуры

тов для установления связи между предельными значениями структурного и косвенного диагностического параметра или по статистической обработке результатов замеров диагностических параметров соответствующих определенным категориям (классам) технического состояния.

Чувствительность диагностического параметра — это отношение относительного отклонения диагностического параметра к отклонению структурного параметра

$$k = \frac{\overline{\Delta C}}{\Delta D}, \quad (9.2)$$

где $\overline{\Delta C}$ — относительное отклонение структурного (внутренне-го) параметра, $\overline{\Delta C} = \Delta C/C$; $\overline{\Delta D}$ — относительное отклонение диагностического параметра, $\overline{\Delta D} = \Delta D/D$.

В процессе диагностирования технического состояния автомобиля важно знать, на сколько выработали свой ресурс на данный момент времени те или иные его системы и какой остаточный ресурс для них можно прогнозировать. Для решения этой задачи можно использовать технические средства диагностирования или расчетные методы. Расчетные методы определения ресурса используют *модели наработки* (ресурса). Ресурс, например ДВС автомобиля, назначается из определенного вида нагрузок и их продолжительности, а также условий эксплуатации. В эксплуатации конкретного автомобиля распределение нагрузок может не соблюдаться, поэтому для приведения к расчетным условиям можно воспользоваться формулой расчета выработанного ресурса [26]:

$$R_{\text{выр}} = \frac{\sum \tau}{\frac{\tau_1}{a_1 R_1} + \frac{\tau_2}{a_2 R_2} + \dots + \frac{\tau_n}{a_n R_n}} A_1^{-1},$$

где $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ — фактические наработки на режимах, ч; a_1, a_2, \dots, a_n — коэффициенты влияния отклонения частоты вращения коленчатого вала от номинальных значений на прочность двигателя автомобиля; R_1, R_2, \dots, R_n — ресурсы, соответствующие определенной нагрузке; A_1 — коэффициент влияния числа пусков двигателя.

Значение τ для каждого режима определяется по хронометражу или пересчетом показаний спидометра.

Остаточный ресурс $R_{\text{ост}}$ составляет разность между ресурсами назначенным R_y и выработанным $R_{\text{выр}}$:

$$R_{\text{ост}} = R_y - R_{\text{выр}}.$$

Таблица неисправностей является конечным результатом математического описания конструктивного элемента автомобиля как объекта диагностирования и представляет собой соединение собственно таблицы неисправностей и способов их устранения.

Таблица неисправностей включает в себя по вертикали (слева) перечень неисправностей, по горизонтали — диагностические признаки, справа (по вертикали) даются способы устранения неисправностей.

Описание неисправности осуществляется комплексом параметров, которые представлены в пустых ячейках таблицы.

Таблицу неисправностей обслуживающий персонал может использовать как метод «диагностического мышления» для оценки состояния автомобиля и поиска конкретных неисправностей.

9.6. Организация диагностирования автомобилей в системе технического обслуживания и ремонта

Диагностирование автомобилей является элементом системы их ТО и Р. На автотранспортном предприятии оно обеспечивает процессы ТО и Р целенаправленной, индивидуальной информацией о техническом состоянии каждого отдельно взятого автомобиля.

Дорожный контроль за техническим состоянием автомобиля осуществляют при помощи встроенного диагностирования; ежедневное обслуживание обеспечивается контрольным осмотром, ТО-1 сопровождается комплексом диагностирования Д-1, в основном механизмов, обеспечивающих безопасность движения автомобиля. Перед ТО-2 и ТР проводят углубленное диагностирование Д-2 агрегатов и механизмов.

При этом для обеспечения промежуточного и заключительного контроля качества регулировочных и ремонтных работ, без дополнительных перемещений автомобиля диагностирование совмещают с операциями ТО и Р.

Входной параметр — качественная мера воздействия на систему извне. К входным параметрам относят нагрузку на автомобиль, дорожные, климатические и другие условия.

Выходной параметр характеризует внешнее проявление свойства системы. Выходные параметры — мощность двигателя, расход топлива, частота вибрации элементов трансмиссии, усилия торможения автомобиля и др. Например, увеличение зазора в коренных и шатунных подшипниках коленчатого вала понижает давление смазки в системе, порождает шум и стуки.

Автомобиль считается *исправным*, если все параметры как структурные, так и выходные находятся в допустимых пределах изменений.

Автомобиль считается *работоспособным*, если он в данное время удовлетворяет всем требованиям, установленным в отношении основных структурных и выходных параметров, характеризующих допустимые пределы изменения. Работоспособный автомобиль может быть исправным и неисправным. Таким образом, исправный автомобиль всегда работоспособен, а неисправный может быть как работоспособным, так и отказавшим.

Для диагностирования будущего состояния элементов автомобиля проводится углубленная диагностика элементов автомобиля, обеспечивающих его работоспособность.

Отказ автомобиля в целом может быть обусловлен отказом одного или нескольких элементов. Различают субъективный и объективный поиск отказов и неисправностей.

На рис. 9.3 показана схема поиска отказов.

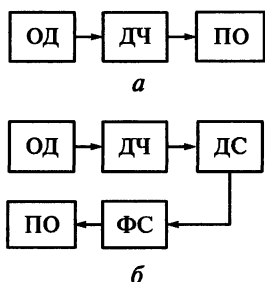


Рис. 9.3. Схема поиска отказов:

а — субъективный поиск; *б* — объективный поиск; ОД — объект проверки; ДЧ — деятельность человека; ПО — выявление причины отказа; ДС — диагностическая система; ФС — процесс функционирования системы

Субъективный поиск (рис. 9.3, *а*) основан на опыте и навыках человека-оператора и проводится, как правило, без использования инструментальных средств. Под субъективным диагностированием понимается определение диагностических параметров, поддающихся при наличии опыта и знаний оценке с помощью органов чувств механика-диагностика или с применением отдельных простейших средств для усиления сигнала.

Объективный поиск (рис. 9.3, *б*) помимо деятельности человека обязательно предусматривает функционирующую диагностическую систему, позволяющую получить фиксированные числовые значения оценочных параметров. Объективное диагностирование представляет собой процесс диагностирования, осуществляемый с помощью контрольно-измерительного оборудования, приборов и инструмента. Определение технического состояния элементов автомобиля производится путем сравнения полученных показателей выходных параметров с их предельными значениями.

Система диагностирования и комплекс диагностической аппаратуры на автотранспортном предприятии должны быть рассмотрены с точки зрения ее организации, функционирования и экономической эффективности.

В этом случае автомобиль рассматривается как объект диагностирования (ОД) (рис. 9.4). Изучают его элементы, имеющие потребность в диагностике, а именно те из них, которые в процессе работы изменяют техническое состояние. Составляется программа поиска, на основании которой определяется потребность в диаг-

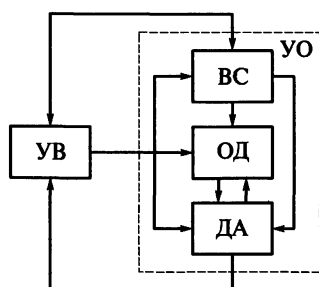


Рис. 9.4. Система управления с обратной связью:

УВ — управляющие воздействия; ВС — внешняя среда; ОД — объект диагностирования; ДА — диагностическая аппаратура; УО — управляемый объект

ностической аппаратуре (ДА), взаимодействующей с объектом диагностирования, разрабатываются технологические процессы контроля и диагностирования, представляющие собой управляющие воздействия (УВ) на объект диагностирования, оценивается экономическая эффективность диагностики. На систему действует внешняя среда (ВС) — возраст автомобилей, мощность предприятия, климатические и дорожные условия и т.д., которые накладывают ограничения на функционирование системы.

Представленная схема диагностической системы является системой управления технологическим процессом диагностирования с каналами прямой и обратной связи. Диагностическая аппаратура посылает информацию с результатами диагностирования в управляющую систему, которая на основе целей управления и ограничений внешней среды ВС вырабатывает управляющее воздействие УВ на объект диагностирования ОД. Процессы могут повторяться до тех пор, пока не будет ясности в результатах проверки.

9.7. Виды диагностики автомобилей

В специальной литературе встречаются термины эксплуатационная и заводская диагностика. Между ними имеется существенное отличие.

Сущность **эксплуатационной диагностики** заключается в изменении выбранных симптомов, формировании диагноза и прогнозировании ресурса работоспособного состояния объекта.

Если же проверка ограничивается только измерениями числовых значений симптомов и сравнением их с техническими условиями без последующего прогнозирования ресурсов, то это функциональный контроль, называемый **заводской диагностикой**. Применяется заводская диагностика преимущественно на автомобилестроительных заводах и реже — на авторемонтных предприятиях с целью определения качества выпускаемой продукции. На автомобильных заводах посты каждого конвейера оборудованы диагностическими стендами с беговыми барабанами. На них выполняется объективный контроль основных агрегатов и систем; двигателя, тормозов, ходовой части, рулевого управления. При этом измеряются развиваемая двигателем мощность, тормозные моменты, боковые усилия, возникающие при вращении управляемых колес, и т.д.

Эксплуатационная диагностика имеет более широкое назначение.

Периодическое диагностирование с прогнозированием позволяет своевременно обнаруживать и устранять неисправности, тем самым не допускать появления отказов. Она является основой профилактики и способствует значительному продлению срока работоспособного состояния автомобилей.

Эксплуатационную диагностику можно классифицировать:

- как комплексную (общую) и поэлементную;
- целевую и совмещенную;
- по месту проведения — производственную и дорожную (или полевую);
- по полноте охвата автомобиля контролем — полную и частичную.

Общая диагностика проводится для общей оценки состояния автомобиля. В отличие от нее *поэлементная* представляет собой более глубокий вид объективного контроля и выполняется с целью выявить причины и место дислокации неисправности.

Если общая диагностика выполняется в очень малый период времени и по ограниченному числу признаков, то ее называют *экспресс-диагностикой*.

Целевая диагностика применяется в тех случаях, когда необходимо установить перечень профилактических и ремонтных работ, требуемых данному автомобилю, который подан на техническое обслуживание.

При уборке урожая, массовых вывозках строительных материалов и в других случаях, когда подвижной состав длительное время работает в отрыве от автотранспортного предприятия, потребность в контроле возрастает. Применяемая здесь диагностика получила название *полевой*, или *дорожной*. При этом используются легкие переносные средства.

В литературе встречаются понятия полной и частичной диагностики состояния автомобилей. *Полная диагностика* выполняется на предприятии с применением стендов и разнообразных приборов.

Частичная диагностика служит в основном для оценки состояния механизмов, влияющих на безопасность движения. Работы организуются на специализированных диагностических стендах.

Большой перечень видов объективного контроля можно объяснить разнообразием условий его применения и назначений.

Рассмотрим процесс диагностики состояния автомобилей в условиях автотранспортного предприятия, в котором используются общая и поэлементная (частная) диагностика. Схема модели диагностирования состояния автомобиля показана на рис. 9.5.

Вначале автомобиль подвергается общей диагностике. По измеренным комплексным параметрам и ранее приобретенной информации о данном автомобиле формируют диагноз. В зависимости от него автомобиль может быть отнесен к категориям: «исправен» или «неисправен». В первом случае остается сделать прогноз ресурса работоспособного состояния автомобиля. Во втором случае применяется поэлементная диагностика для установления причин неисправностей и мест их размещения на автомобиле. Здесь измеряются один за другим (в целесообразной последовательности) частные параметры. Их значения сравниваются с нормативными.

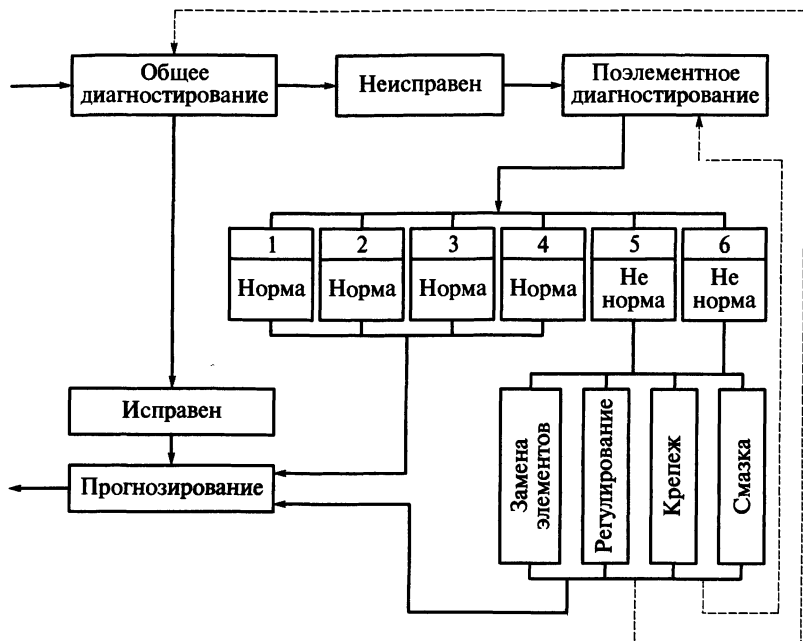


Рис. 9.5. Модель диагностирования технического состояния автомобиля

Обнаруженная неисправность устраняется ремонтом. Затем прогнозируется ресурс автомобиля. Иногда после частного диагностирования и исправления неисправностей (в каком-то одном механизме) автомобиль подвергают общей диагностике (на схеме пунктирная линия). Но и в этом случае в заключение осуществляется прогнозирование ресурса.

9.8. Диагностирование агрегатов автомобилей при ремонте

Разновидности стратегий ремонта по наработке и по техническому состоянию предусмотрены в ГОСТ 25866—83 «Эксплуатация техники. Термины и определения». Замена элементов машин по наработке в зависимости от назначенной периодичности замен может привести либо к значительному недоиспользованию ресурса сопряжения, либо к его отказу. Кроме того, только разборка в целях дефектации деталей и последующая сборка работоспособного сопряжения приводят к сокращению его ресурса на 30...40 %.

Избежать этих потерь позволяет стратегия ремонта по техническому состоянию. Экономический эффект от использования та-

кой стратегии может достигать 30 % стоимости парка машин (см. гл. 8).

Средства диагностирования представляют собой технические устройства, предназначенные для измерения диагностических параметров тем или иным методом. Они включают в себя:

- устройства, задающие тестовый режим;
- датчики, воспринимающие диагностические параметры в виде, удобном для обработки или непосредственного использования (как правило, в виде электрического сигнала);
- устройства для обработки сигнала (усиления, анализа, фильтрации), для постановки диагноза, индикации результатов, их хранения или передачи в органы управления.

Средства диагностирования бывают внешними, т.е. не входящими в конструкцию автомобиля, и встроенными, являющимися элементом его конструкции.

Внешние средства диагностирования в зависимости от их технологического назначения могут быть выполнены в виде переносных приборов и передвижных станций, укомплектованных необходимыми измерительными устройствами, и стационарных стендов. На автотранспортном предприятии применяют стенды и переносные приборы, а в отрыве от постоянных баз — подвижные станции диагностирования и бесстендовые диагностические средства. Внешние средства диагностирования обеспечивают получение и обработку информации о техническом состоянии автомобилей, необходимой для их обслуживания и ремонта.

Встроенные средства диагностирования включают в себя входящие в конструкцию автомобиля датчики и приборы (электронно-вычислительные приборы, блоки питания, индикацию) для обработки диагностических сигналов (усиления, сравнения с нормативами) и непрерывного или достаточно частого измерения параметров технического состояния автомобиля. Простейшие средства встроенного диагностирования реализуются в виде традиционного щитка приборов водителя. Более сложные средства встроенного диагностирования позволяют водителю постоянно контролировать состояние тормозов, расход топлива, токсичность отработавших газов, а также выбирать наиболее экономичные и безопасные режимы работы автомобиля или своевременно прекращать движение при аварийной ситуации. Кроме того, наличие таких средств дает возможность водителю своевременно устранять мелкие неисправности приборов системы питания и зажигания непосредственно на линии.

Недостатком сложных средств встроенного диагностирования является необходимость оборудования каждого автомобиля в отдельности дорогостоящей аппаратурой. Применение таких встроенных средств диагностирования, в первую очередь, целесооб-

разно на специальных автомобилях сложной конструкции, требующих обеспечения повышенной безотказности.

В качестве примера рассмотрим способы диагностирования технического состояния кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов, которое значительно влияет на топливную экономичность, мощность и пуск двигателя. На их долю приходится около 20 % случаев неисправностей. Значение газораспределительного механизма возрастает еще и потому, что от него зависит работа приборов систем питания и зажигания. Диагностирование состояния этих механизмов осуществляется многими методами:

- по шумам и стукам, характеристики которых оцениваются с помощью электронных и обычных стетоскопов;
- по акустическим сигналам с применением виброакустических устройств и приборов;
- по измерению количества относительной утечки сжатого воздуха, подаваемого в надпоршневое пространство цилиндров (для оценки состояния клапанов);
- по величине давления в масляной магистрали.

Выполнение диагностических работ осуществляется с помощью специальных устройств и приборов.

9.9. Диагностирование состояния цилиндропоршневой группы

На долю цилиндропоршневой группы приходится около 13 % всех случаев неисправностей двигателя. Их устранение занимает 23 %, т. е. почти четвертую часть трудоемкости текущего ремонта, приходящегося на двигатель в целом. Отсюда следует, что своевременное распознавание и предупреждение неисправностей имеет большое значение не только для повышения надежности, но и сокращения трудозатрат.

Диагностирование цилиндропоршневой группы может осуществляться следующими методами:

- по количеству прорывающихся газов в картер двигателя;
- замеру относительной утечки сжатого воздуха, подаваемого в цилиндры (в установленной последовательности);
- разрежению во впускном трубопроводе двигателя;
- давлению газов в цилиндре в конце такта сжатия;
- характеру стуков и шумов, измеряемых простейшими (стетоскопы) и сложными (виброакустическими) приборами.

Применяются также другие методы: по угару масла, по концентрации железа в картерном масле.

В практике автотранспортных предприятий и станций технического обслуживания автомобилей широкое применение имеет ряд приборов, например:

- прибор мод. КИ-4887-1, позволяющий измерять количество газов, прорывающихся в картер двигателя;

- прибор мод. ППГ-1, дающий возможность измерить абсолютное количество газов, прорывающихся в картер в любой момент времени;

- прибор мод. К-69М, позволяющий измерять утечку воздуха из надпоршневого пространства цилиндра;

- автомобильный вакуумметр, предназначенный для диагностирования состояния двигателя по разрежению во впускном трубопроводе. Основные части: датчик и стрелочный указатель разрежения. Чувствительный элемент датчика — мембрана, прогибаясь, передает перемещение через специальное устройство стрелке прибора. Пределы измерений — 0 ... 760 мм рт. ст.;

- электронные стетоскопы, позволяющие по стукам поршней, пальцев и других деталей оценивать состояние цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Такой стетоскоп является двухтранзисторным усилителем низкой частоты с пьезокристаллическим датчиком. В корпус вмонтированы преобразователь и элементы питания. В гнездах корпуса крепятся с одной стороны стержень-датчик, с другой — провод наушника. Электронные стетоскопы имеют сравнительно высокую чувствительность.

Стуки поршня лучше прослушиваются в момент его перехода через мертвую точку (при работе слабо прогретого двигателя). Стуки пальцев — у прогретого двигателя при резко переменных режимах работы. Повышенные стуки свидетельствуют об увеличенных зазорах в сопряжениях изношенных деталей.

Более прогрессивной является диагностика с помощью ультразвука. В специальном приборе волны излучаются генератором, выполненным в виде зонда с головкой, содержащей кристалл. Датчик-зонд прикладывается к проверяемым местам поверхности двигателя. Отраженные от деталей ультразвуковые волны изображаются на экране дисплея. По их характеру визуально без особых трудностей определяют место (относительно датчика) и вид повреждения: задиры, отколы и даже мельчайшие усталостные трещины.

Оценка состояния цилиндропоршневой группы по расходу (угару) масла — один из наиболее доступных методов диагностики. Дело в том, что с ухудшением состояния двигателя возрастает расход масла. Причин тому две. Увеличение износов канавок поршня и колец по высоте усиливает насосное действие колец; больше попадает масла в камеру сгорания. Вместе с тем износы цилиндров и поршневых колец по окружности увеличивают зазоры замков и способствуют большему прорыву газов в картер. Из-за этого некоторая часть масла выносится в виде тумана через горловину сапуна в атмосферу, загрязняя окружающую среду.

Измеряя величину долива масла до заданного уровня можно в какой-то мере определить состояние двигателя. Допустимый угар масла — не более 4 % от расхода топлива. Следует иметь в виду, что перерасход масла может быть и у исправного двигателя при чрезмерно больших нагрузках и повышенном тепловом режиме.

9.10. Концепция диагностирования техники в современных условиях

Общие положения концепции технического диагностирования машин в настоящее время в основном не изменились. Это относится к цели, задачам, методам, средствам, алгоритмам диагностирования, применению накладных датчиков и др. Однако в тактическом плане есть настоятельная необходимость совершенствования этой концепции.

Необходимо проводить следующую техническую политику:

- разрабатывать и ставить на производство недорогие, простые в эксплуатации диагностические приборы и устройства, применение которых позволяет предупреждать наиболее часто возникающие отказы и неисправности составных частей (топливной аппаратуры, цилиндропоршневой группы, смазочной системы, гидропривода, электрооборудования, рулевого управления);
- разрабатывать и использовать перспективные электронные системы для крупных дилерских структур, центров технического сервиса, ремонтных заводов, состоящие в основном из серийно изготавливаемых комплектующих изделий, что обеспечивает их высокую надежность и относительно небольшую стоимость. Например, применение универсального компьютерного тестера, состоящего в основном из серийных микрокомпьютера, измерительного интерфейса и датчиков;
- разрабатывать и ставить на производство стационарные и передвижные комплекты диагностических средств для контроля состояния машин в целом, с их применением на автотранспортных предприятиях, в центрах технического сервиса. Широко развивать разработку и продажу комплектов средств диагностирования отдельно для агрегатов и систем: двигателя, топливной аппаратуры, гидропривода, электрооборудования, трансмиссии, рабочих органов машин. Упомянутые комплекты, находящиеся в удобных контейнерах, можно переносить или перевозить на любом транспортном средстве (включая мотоцикл) к машине для установления и устранения неисправностей ее агрегата;
- вместо громоздких и дорогих диагностических стендов, в особенности для диагностирования автомобилей, ставить на производство малогабаритные приборы, предназначенные для измере-

ния выходных параметров машин (например, прибор для определения мощности двигателя с повышенными метрологическими характеристиками);

- использовать новые методы и средства диагностирования в металлоемком и дорогостоящем оборудовании в целях резкого снижения его стоимости и габаритов. Например, применение диагностических приборов в стенде для обкатки двигателей позволяет в 1,5 раза снизить его металлоемкость и цену при достаточно высокой точности измерений;

- расширить область применения диагностирования за счет дополнительного использования средств при предпродажном ТО, сертификации услуг при ТО и Р, оценке стоимости при покупке подержанных машин и продаже их после ремонта;

- разрабатывать технологии диагностирования с учетом особенностей эксплуатации машин в регионах, в первую очередь принимая во внимание допускаемые значения параметров, тесно связанные с климатическими условиями. Исследования показали, что издержки на ТО и Р по результатам диагностирования с учетом условий региона уменьшаются на 20... 30 %;

- расширить область прогнозирования остаточного ресурса узлов и агрегатов, что позволит дополнительно увеличить их фактически используемый ресурс на 15...25 % при прочих равных условиях. Распространить диагностирование, прогнозирование остаточного ресурса на технические жидкости, в первую очередь на моторные, трансмиссионные и гидравлические масла, что значительно снизит число неисправностей из-за низкого качества этих жидкостей.

Основное внимание следует уделять постановке на серийное производство наряду с новыми и модернизированными механическими приборами электронных и компьютеризированных диагностических средств.

9.11. Техническое диагностирование — важный элемент технологической сертификации услуг сервисных предприятий

Технологическая сертификация процессов ТО и Р осуществляется в целях реализации законов Российской Федерации «О защите прав потребителей», «О сертификации продукции и услуг» и обеспечения безопасности техники, использование которой может причинить вред жизни и здоровью потребителей, окружающей среде, а также обеспечения повышения ее конкурентоспособности и экспортных возможностей предприятий-изготовителей. Основной целью **системы сертификации** является создание условий для эксплуатации техники на территории Российской

Федерации при ее соответствии установленным требованиям, направленным на обеспечение безопасности жизни, здоровья потребителей, предотвращение вреда их имуществу, а также на охрану окружающей среды.

Система учитывает специфику изготовления и эксплуатации автомобилей, имеет нормативные документы и аккредитованные испытательные центры, обеспечивающие проведение сертификационных испытаний.

Обязательной сертификации подлежат услуги по ТО и Р техники, к которым в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации предъявляются требования, направленные на обеспечение безопасности жизни, здоровья потребителей и предотвращение вреда их имуществу, а также охрану окружающей среды.

Добровольная сертификация проводится по инициативе изготовителя (продавца) продукции, исполнителя услуг (работ) с целью независимой и объективной оценки ТО и Р, производственной эксплуатации машины на соответствие нормативным документам, в том числе требованиям безопасности, и является средством повышения ее конкурентоспособности.

Технологическая сертификация распространяется как на условия производства ТО и Р машин, так и на качество этих процессов.

Технические требования в основном определяются номинальными, допускаемыми и предельными значениями параметров состояния.

При предпродажном обслуживании и в период гарантийного обслуживания контролируемые параметры оценивают по номинальным значениям, после ТО и Р машин в послегарантийный период — по их допускаемым значениям, а при непосредственной эксплуатации — по предельным.

Таким образом, диагностирование направлено на оценку качества ТО и Р, производственной эксплуатации техники и оборудования.

Наряду с инструментальным диагностированием и измерением параметров состояния при технологической сертификации учитывают качественные признаки технического состояния машин и агрегатов. Это намного облегчает процесс сертификации. Качественные признаки состояния должны четко выделяться в процессе контроля машин. В ином случае применяют инструментальное диагностирование.

Особенностью диагностирования при технологической сертификации является то, что число измеряемых параметров состояния машин значительно меньше по сравнению с техническим диагностированием при сложном ТО машин.

Таким образом, техническое диагностирование выполняет важную роль при технологической сертификации услуг по ТО и Р, эксплуатации машин и оборудования.

9.12. Управление надежностью, техническим состоянием машин по результатам диагностирования

Каждая приобретенная машина или ее часть предназначена для выполнения заданных функций и удовлетворения потребительских свойств в определенных условиях производственной эксплуатации. Эти функции реализуются при достаточно высоком работоспособном техническом состоянии машин, характеризующимся совокупностью структурных конструктивных параметров, значения которых находятся в заданных пределах. Структурные параметры состояния машин (зазоры, натяги в сопряжениях), выходные параметры (мощность двигателя, производительность машины и др.) контролируют с помощью диагностических параметров и качественных признаков технического состояния машин.

Показатели надежности в конечном итоге зависят от динамики технического состояния машины или ее составной части, от стабильности их структуры, продолжительности сохранения значений параметров технического состояния в заданных пределах. Ухудшение хотя бы одного структурного параметра и, соответственно, предельного значения технического состояния, означает нарушение исправности или работоспособности машины, ее составной части.

Вероятность нарушения работоспособности или частота отказов при эксплуатации определяет уровень безотказности в течение работы машины, а после хранения, транспортирования — уровень сохраняемости. Увеличение частоты отказов ухудшает показатели ремонтпригодности, отрицательно влияет на долговечность машины и ее составной части. Повышение безотказности в эксплуатационных условиях достигается с помощью управления техническим состоянием машин.

Управление техническим состоянием машин — это целенаправленное изменение их состояния с помощью управляющих воздействий, ведущих к достижению поставленной цели.

Цель управления техническим состоянием, надежностью заключается в обеспечении при изготовлении, восстановлении, ремонте и поддержании при ТО высокого или оптимального уровня работоспособности и исправности машины, в создании условий, позволяющих уменьшить частоту отказов при сокращении материальных и денежных издержек.

Управление техническим состоянием и надежностью машины можно осуществлять различными путями. Наиболее прогрессивный путь — это улучшение физико-механических свойств материалов элементов машины и их конструкции. Эти возможности реа-

лизуют на этапе проектирования, разработки конструкции машины или ее составной части. Применение износостойких материалов, создание условий, сохраняющих энергию, расходуемую на трение и износ составных частей, использование улучшенных уплотнений, фильтрующих элементов резко снижают скорость изнашивания и изменения параметров состояния, увеличивают средний ресурс составных частей. Сокращается число отказов, а значит и число ремонтов машины, их общая трудоемкость, продолжительность и себестоимость.

Рост наработки между отказами дает возможность увеличить периодичность ТО, исключить ряд регламентированных операций, снизить трудоемкость, продолжительность и стоимость обслуживания.

Другой путь управления техническим состоянием и надежностью машин заключается в изменении динамики структурных параметров состояния элементов. Назначая оптимальные допускаемые отклонения структурных параметров технического состояния, изменяя межконтрольную наработку, повышая степень восстановления исходных характеристик при ТО и Р, предупредительно заменяя недолговечные составные части, имеющие более высокие скорости изнашивания, увеличивают наработку между отказами, уменьшают среднюю скорость изменения параметров состояния машины. Эти мероприятия проводят при эксплуатации.

По мере наработки машина стареет, увеличиваются число отказов и ремонтов, продолжительность простоя машины. Это ведет к прогрессивному росту издержек на машину по мере ее эксплуатации. Устанавливая допускаемые, предельные издержки на ТО и Р, своевременно прекращают дальнейшую эксплуатацию машины, ремонтируют или списывают ее, предотвращая тем самым увеличение числа отказов. Издержки становятся обобщенным показателем, управляющим надежностью и техническим состоянием машины.

Для поддержания и восстановления высокого или оптимального уровня работоспособности используют комплекс управляющих показателей, влияющих на техническое состояние и надежность объекта. К ним следует отнести:

- допускаемые и предельные отклонения параметров;
- межконтрольную наработку;
- ресурс или среднюю наработку на отказ;
- назначенный остаточный ресурс до ремонта;
- срок службы машины до списания;
- суммарные издержки на ТО и Р и др.

Ресурс или наработка на отказ характеризует степень восстановления работоспособности составной части при ремонте так же, как эти показатели характеризуют степень обеспечения работоспособности при ее изготовлении.

В процессе эксплуатации управление техническим состоянием машины осуществляется путем контроля состояния, назначения и проведения ремонтно-обслуживающих работ, предупреждающих отказы или устраняющих их последствия. В результате проведения соответствующих технических мероприятий восстанавливают ресурсные и функциональные параметры машин до уровня номинальных или близких к ним значений.

При эксплуатации техники цель управления заключается в сохранении высокой или оптимальной надежности машины как управляемой системы.

При управлении надежностью машин диагностирование их составных частей и прогнозирование технического состояния и остаточного ресурса выступают как отдельные этапы процесса.

Перспективным является метод предупреждения отказов, неисправностей за счет широкого использования метода выполнения операций ТО и Р по состоянию машины после контроля, диагностирования. Этот метод широко развит за рубежом. Его использование позволяет повысить наработку на отказ контролируемых составных частей машин в 3 — 5 раз при относительно малом уменьшении среднего их ресурса (на 15...30 %).

В ряде случаев при небольших простоях и издержках, вызванных отказом, следует использовать метод ТО и Р по потребности, после отказа. В настоящее время именно этот метод получил наибольшее распространение.

Имеется еще один планово-предупредительный метод ТО и Р после определенной наработки, вне зависимости от технического состояния. Он является наименее неэкономичным, хотя в недавнем прошлом был широко распространен.

Таким образом, стратегия развития системы диагностирования и управления техническим состоянием машин в условиях рынка должна быть направлена на расширение применения метода ТО и Р по состоянию за счет сокращения области применения этого метода по наработке, а также выявлению составных частей машин, обслуживание и ремонт которых экономически целесообразно проводить по потребности после отказа.

9.13. Диагностика и безопасность автомобиля

К вопросам безопасности автомобилисты стали обращаться сразу же после того, как появилось достаточно большое количество автомобилей на дорогах и произошли первые аварии. Причины аварий были разные, но большинство было связано с неисправностью той или иной системы в автомобиле. И, конечно же, одним из первых факторов был — способность автомобиля затор-

мозить в нужный момент. В середине 1920-х гг. США лидировали по числу автомобилей, поэтому американцы первыми стали задаваться вопросами обеспечения безопасности автомобиля на дороге. Основной параметр, влияющий на безопасность, — исправность тормозной системы. Опытным путем было установлено, что из 400 автомобилей, только 45 машин (11,2 %) могли быть остановлены на расстоянии менее 9 м при первоначальной скорости движения автомобиля в 32 км/ч. Следует однако заметить, что теоретически автомобили с тормозами на все четыре колеса при этой же начальной скорости движения должны проходить на тормозах приблизительно не более 4,5 м, а при обыкновенных тормозах (на два колеса) соответственно не более 6 м. У 120 машин (30 %) путь торможения оказался более 15 м.

Эти данные заставили задуматься о необходимости периодической проверки состояния тормозной системы автомобиля. Первыми методами испытаний стали дорожные испытания, но у них выявилось много недостатков. Это привело исследователей к проведению стендовых испытаний. Первыми здесь стали англичане, которые не менее активно занимались вопросами обеспечения безопасности на дорогах своей страны и сконструировали первый платформенный тормозной стенд. Он состоял из четырех (по числу колес) движущихся на уровне пола платформ, смонтированных на ролики и независимых одна от другой. На переднем конце каждой платформы имеется измерительный прибор, непосредственно соединенный со своим указателем на контрольном щите. Когда испытываемая машина въезжает на платформы, пускают в дело тормоза для приведения ее в состояние покоя. При этом каждая платформа, получив при въезде на нее машины поступательное движение, будет стремиться продолжать его в силу инерции и нажимать на поршень измерительного прибора, помещенного на ее переднем конце. В результате стрелка указателя на контрольном щите покажет величину тормозного давления для данного колеса.

Американцы внесли в конструкцию стенда небольшие изменения, в частности в приборы индикации тормозных усилий.

Платформенные стенды производятся и применяются и в настоящее время, но в основном для экспресс-диагностики на станциях технического обслуживания. Многие были подключены к компьютерам, например стенды компании Weaver («Вивер»), однако принцип их работы до сих пор сохранился таким же, как и 80 лет назад.

Платформенный стенд дает лишь приблизительные показания о состоянии тормозной системы, а самые точные результаты могут дать только стенды, на которых происходит вращение колес автомобиля и их торможение. Вследствие этого начали разрабатываться роликовые тормозные стенды.

В 1928 г. появился первый в мире роликовый тормозной стенд производства фирмы Bendix Cowdrey Co.Ltd.

К диагностированию тормозной системы стали добавлять диагностирование других параметров, влияющих на безопасность автомобиля на дороге, а именно — силу света фар, состояние подвески и рулевого управления, а уже когда был изобретен газоанализатор, то и экологические параметры двигателя.

В Европе программа обязательной проверки автомобилей с помощью специальных диагностических стендов была введена в начале 1960-х гг.

С введением обязательного страхования особое значение приобрела система автосервиса. Станция автосервиса не только проводит тестирование автомобиля по мере выработки ресурса (каждые 30...35 тыс. км пробега), но и в обязательном порядке за деньги владельца автомобиля проводит обслуживание и ремонт тормозов, рулевого механизма, других систем и агрегатов, влияющих на безопасность движения. После такого обязательного обслуживания автомобиль проходит выходное тестирование и, если все в порядке, в сервисной книжке делается соответствующая отметка. Надежность автомобиля гарантируется, таким образом, до следующего осмотра, а станция автосервиса несет определенную ответственность за качество восстановления ресурса тормозов и других механизмов до следующего осмотра. Водитель обязан всегда иметь при себе страховой полис и сервисную книжку.

Применение современного оборудования и технологий, позволило до минимума сократить число обслуживающего персонала и в то же время намного увеличить пропускную способность станции технического обслуживания. Для полной проверки автомобиля требуется всего приблизительно 10 мин.

9.14. Диагностика тормозной системы

Согласно действующему ГОСТ Р 51709—2001 «Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки» применяется два основных метода диагностики тормозов — дорожный и стендовый. Для них, соответственно, установлены следующие параметры:

1) при проведении дорожных испытаний:

- тормозной путь;
- установившееся замедление;
- линейное отклонение;
- уклон дороги, на котором должно неподвижно удерживаться АТС;

2) при стендовых испытаниях:

- общая удельная тормозная сила;
 - коэффициент неравномерности тормозных сил колес оси;
- 3) для автопоезда дополнительно:
- коэффициент совместимости звеньев автопоезда;
 - асинхронность времени срабатывания тормозного привода.

Общим диагностическим параметром для обоих методов испытаний является усилие на рабочем органе привода тормозной системы. Истинную картину неравномерности торможения можно получить лишь при стендовых испытаниях. Неравномерность тормозных сил, по мере возрастания средних скоростей движения автомобиля, оказывает все большее влияние на безопасность дорожного движения, поэтому необходимо применять диагностические методы и соответствующее оборудование для эффективного контроля тормозных сил.

В мире на сегодняшний день существует несколько методов и видов стендов:

- испытания на силовых роликовых тормозных стендах;
- испытания на инерционных роликовых тормозных стендах;
- статические тормозные испытания;
- испытания на площадочных тормозных стендах.

В соответствии с ГОСТ 51709 — 2001 каждое измерение по тормозам проводят не менее двух раз, для обеспечения повторяемости проведения испытаний.

Роликовые тормозные стенды позволяют получать более корректные результаты. При каждом повторении испытания они способны обеспечить условия (прежде всего скорость вращения колес), абсолютно одинаковые с предыдущими. Что обеспечивается точным заданием начальной скорости торможения внешним приводом. Кроме того, при испытании на силовых роликовых тормозных стендах предусмотрено измерение так называемой овальности — оценка неравномерности тормозных сил за один оборот колеса, т. е. исследуется вся поверхность торможения.

Площадочные тормозные стенды пригодны для входной экспресс-диагностики на станциях технического обслуживания, но не для углубленной диагностики.

На инерционных тормозных стендах используется метод, создающий условия торможения автомобиля, максимально приближенные к реальным. Но из-за дороговизны стенда, недостаточной безопасности, трудоемкости и слишком большого времени, требующегося на диагностику, стенд такого типа не будет рентабелен.

Электронные стенды динамической проверки автомобилей, например фирмы НЕКА Auto Test GmbH (Германия), обеспечивают измерение тормозной силы рабочей и стояночной тормозных систем, суммарного схождения колес обеих осей и дают оценку состояния подвески автомобиля по амплитудам колебания после

торможения. Стенд состоит из измерительных платформ, устройства определения суммарного схождения колес, специализированного дисплея и принтера. В основу работы стендов динамической проверки положен принцип прямого измерения тормозной силы с помощью силоизмерительных датчиков, установленных под измерительными платформами. Датчики измеряют силу, приложенную к поверхности платформы, возникающую при торможении испытуемого автомобиля. Тормозные усилия сканируются датчиками в течение всего времени торможения и полученная информация обрабатывается компьютерным блоком, при этом значение максимальной тормозной силы в ньютонах высвечивается на дисплее стенда. Все текущие значения тормозной силы с интервалом в 0,05 с выдаются на принтер и показываются на распечатке.

Дисплей оборудован цветовым индикатором (красный, желтый, зеленый цвета) эффективности торможения и неравномерности тормозных сил колес по каждой оси. Динамический метод измерений позволяет легко определять тормозные усилия даже на автомобилях с постоянным полным приводом колес.

Величина суммарного схождения колес каждой оси автомобиля определяется при проезде испытуемого автомобиля через устройство определения суммарного схождения колес. Устройство состоит из двух установленных параллельно платформ — подвижной и неподвижной. Поперечное отклонение подвижной платформы, вызванное наличием угла схождения, измеряется с помощью встроенного датчика и обрабатывается компьютерным блоком. Величина суммарного схождения колес в миллиметрах высвечивается на дисплее и распечатывается на принтере.

Информация о динамических колебаниях автомобиля после его остановки на измерительных платформах распечатывается на принтере и позволяет оценить эффективность работы подвески испытуемого автомобиля.

Скорость автомобиля во время прохождения теста должна составлять 5...10 км/ч. Информация о скорости испытуемого автомобиля автоматически измеряется и распечатывается на принтере. Ввод необходимых данных и управление стендом легко осуществляется мастером автосервиса непосредственно из испытуемого автомобиля с помощью пульта дистанционного управления. Для графического отображения результатов измерений предусмотрена возможность подключения персонального компьютера с монитором, а в комплектацию стендов включено необходимое программное обеспечение.

Результаты измерений и заключение распечатываются на русском языке. Диапазон рабочих температур от -20 до $+40$ °С.

Стенд диагностирования тормозной системы должен устанавливаться на въезде или проезде автосервиса. На рис. 9.6 и 9.7 показаны примеры, соответственно, компоновки оборудования ли-

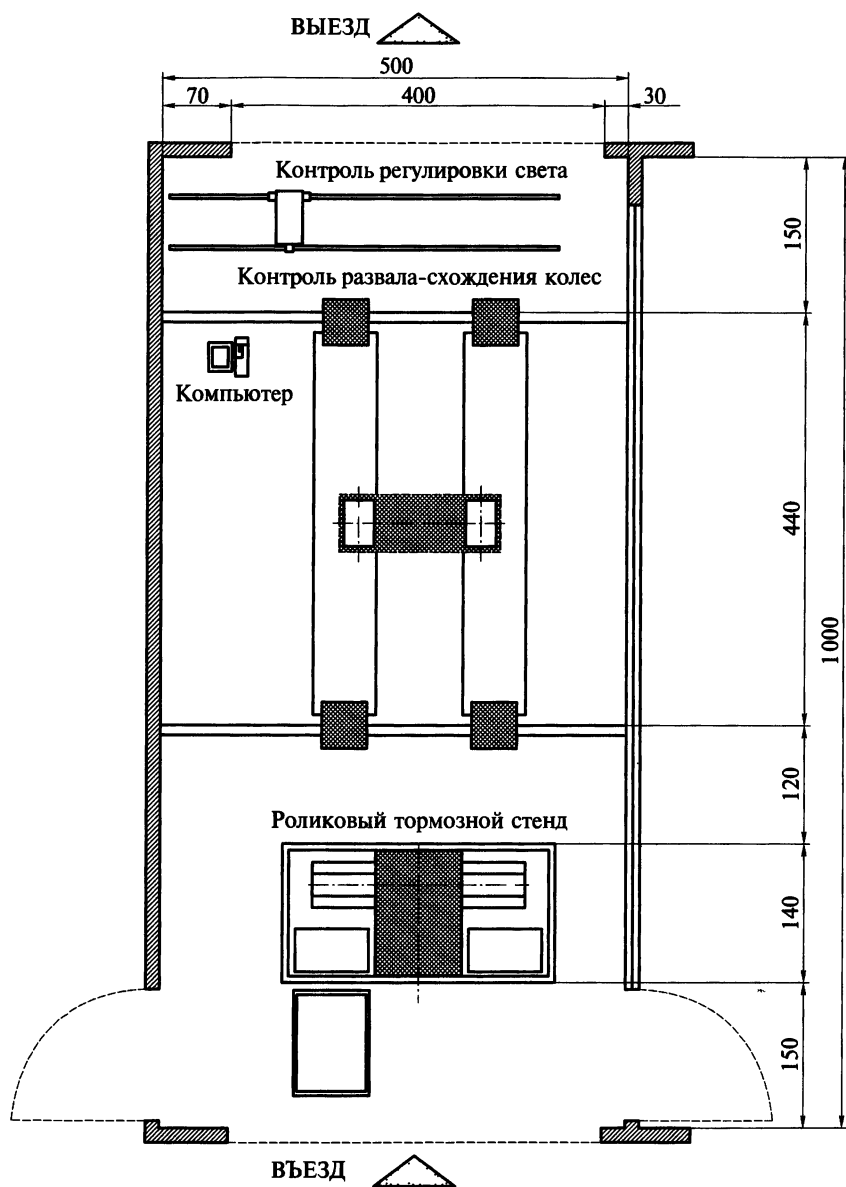


Рис. 9.6. Пример компоновки оборудования линии диагностики тормозной системы легкового автомобиля

нии диагностики тормозной системы легкового автомобиля и распечатки результатов стендового диагностирования тормозной системы и подвески легкового автомобиля.























<div> Заказ № 15</div>		<div> 9:40:45</div>		<div><div> Дата 04.06 02</div></div>																																																																																									
<div><div> Клиент</div><div>Tel</div></div>		<div><div> Авт</div><div>Гос номер Марка Модель Номер кузова Пробег, км 22222</div></div>		<div><div> Тех осмотр Смена масла</div></div>																																																																																									
<div><div> Тест Передняя ось</div></div>		<div><div> Задняя ось</div></div>		<div>Результат</div>																																																																																									
<div><div> Схождение</div><div>Плюс 4,2 MM Норма 1,0 1,0</div></div>		<div>Минус 0,4 MM Норма 0,0.. 4,0</div>		<div>Схожд ПО не в норме Схожд ЗО не в норме</div>																																																																																									
<div><div> Тест Передняя ось</div></div>		<div><div> Задняя ось</div></div>		<div><div> Стояночный тормоз</div></div>																																																																																									
<div><div> Тормоза</div><div>Тест</div><table><tr><td>Левое</td><td>%</td><td>Пел.</td><td>Правое</td></tr><tr><td>147</td><td>5</td><td>0</td><td>156</td></tr><tr><td>147</td><td>5</td><td>0</td><td>156</td></tr><tr><td>204</td><td>3</td><td>0</td><td>274</td></tr><tr><td>784</td><td>4</td><td>0</td><td>834</td></tr><tr><td>1461</td><td>4</td><td>0</td><td>1530</td></tr><tr><td>3050</td><td>4</td><td>0</td><td>2148</td></tr><tr><td>3334</td><td>4</td><td>0</td><td>2443</td></tr></table><div>Коэфф (норма) 41 (201)</div></div>		Левое	%	Пел.	Правое	147	5	0	156	147	5	0	156	204	3	0	274	784	4	0	834	1461	4	0	1530	3050	4	0	2148	3334	4	0	2443	<table><tr><td>Левое</td><td>%</td><td>Пел</td><td>Правое</td></tr><tr><td>147</td><td>20</td><td>0</td><td>117</td></tr><tr><td>147</td><td>20</td><td>0</td><td>117</td></tr><tr><td>343</td><td>34</td><td>0</td><td>225</td></tr><tr><td>274</td><td>28</td><td>0</td><td>196</td></tr><tr><td>1230</td><td>33</td><td>0</td><td>834</td></tr><tr><td>833</td><td>34</td><td>0</td><td>540</td></tr><tr><td>3334</td><td>35</td><td>0</td><td>1510</td></tr></table> <div>351 (201)</div>		Левое	%	Пел	Правое	147	20	0	117	147	20	0	117	343	34	0	225	274	28	0	196	1230	33	0	834	833	34	0	540	3334	35	0	1510	<table><tr><td>Левое</td><td>%</td><td>Правое</td></tr><tr><td>127</td><td>23</td><td>100</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>137</td><td>23</td><td>100</td></tr><tr><td>1137</td><td>23</td><td>1471</td></tr><tr><td>1003</td><td>23</td><td>3443</td></tr></table> <div>Тормоза не в норме</div>		Левое	%	Правое	127	23	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	137	23	100	1137	23	1471	1003	23	3443
Левое	%	Пел.	Правое																																																																																										
147	5	0	156																																																																																										
147	5	0	156																																																																																										
204	3	0	274																																																																																										
784	4	0	834																																																																																										
1461	4	0	1530																																																																																										
3050	4	0	2148																																																																																										
3334	4	0	2443																																																																																										
Левое	%	Пел	Правое																																																																																										
147	20	0	117																																																																																										
147	20	0	117																																																																																										
343	34	0	225																																																																																										
274	28	0	196																																																																																										
1230	33	0	834																																																																																										
833	34	0	540																																																																																										
3334	35	0	1510																																																																																										
Левое	%	Правое																																																																																											
127	23	100																																																																																											
0	0	0																																																																																											
0	0	0																																																																																											
0	0	0																																																																																											
137	23	100																																																																																											
1137	23	1471																																																																																											
1003	23	3443																																																																																											
<div><div></div></div>		<div><div></div></div>		<div><div></div></div> <div>Разность ПО в норме Разность ЗО не в норме</div>																																																																																									
<div>Общая сила 8610 N Эффективность (норма) 0,80 (0,59) Ножной тормоз Норма для педали 480 N</div>		<div>4045 N 0,47 (0,10)</div>																																																																																											
<div>Тормозные силы 661 Соотношение по осям</div>		<div>461</div>																																																																																											
<div>Вес по осям</div>		<div>Общий вес 950 KG</div>																																																																																											
<div><div> Подвеска</div><table><tr><td>Левое</td><td>Ампл</td><td>Правое</td></tr><tr><td>32</td><td>1</td><td>32</td></tr><tr><td>11</td><td>2</td><td>11</td></tr><tr><td>00</td><td>3</td><td>00</td></tr></table></div>		Левое	Ампл	Правое	32	1	32	11	2	11	00	3	00	<table><tr><td>Левое</td><td>Ампл</td><td>Правое</td></tr><tr><td>XX</td><td>1.</td><td>XX</td></tr><tr><td>XX</td><td>2</td><td>XX</td></tr><tr><td>XX</td><td>3.</td><td>XX</td></tr></table>		Левое	Ампл	Правое	XX	1.	XX	XX	2	XX	XX	3.	XX	<table><tr><td>Левое</td><td>Ампл</td><td>Правое</td></tr><tr><td>19</td><td>1.</td><td>19</td></tr><tr><td>00</td><td>2</td><td>00</td></tr><tr><td>00</td><td>3</td><td>00</td></tr></table> <div>Подвеска проверена</div>		Левое	Ампл	Правое	19	1.	19	00	2	00	00	3	00																																																				
Левое	Ампл	Правое																																																																																											
32	1	32																																																																																											
11	2	11																																																																																											
00	3	00																																																																																											
Левое	Ампл	Правое																																																																																											
XX	1.	XX																																																																																											
XX	2	XX																																																																																											
XX	3.	XX																																																																																											
Левое	Ампл	Правое																																																																																											
19	1.	19																																																																																											
00	2	00																																																																																											
00	3	00																																																																																											
<div><div></div></div>		<div><div></div></div>		<div><div></div></div> <div><div> Левое</div><div> Правое</div></div>																																																																																									
<div>0 1 2 3 sec</div>		<div>0 1 2 3 sec</div>		<div>0 1 2 3 sec</div>																																																																																									

Рис. 9.7. Пример компьютерной распечатки результатов диагностирования автомобиля на стенде

Таким образом, по совокупности своих свойств именно роликовые стенды являются наиболее оптимальным решением для диагностических линий станций технического обслуживания с использованием средств технического диагностирования.

9.15. Диагностика фар головного освещения

Основные требования к внешним световым приборам изложены в ГОСТ Р 51709—2001, в соответствии с которым проверка

должна проводиться на вертикальном экране (стене) с нанесенной специальной разметкой.

Процесс проверки и регулировки внешних световых приборов «на стену» устарел как нетехнологичный и трудоемкий. Его невозможно автоматизировать.

В отличие от него, процесс контроля световых приборов с помощью специальных приборов прост и эффективен. Для того чтобы точнее понять процесс, вначале рассмотрим конструкцию приборов.

Состав прибора:

- поворотное зеркало с линией для установки оптической оси прибора параллельно продольной плоскости симметрии автомобиля;

- поворотная стойка;

- передвижная база на колесиках для качения по рельсам или на пластиковых роликах для перемещения по ровному полу;

- оптическая камера, оснащенная плоской линзой Френеля.

Для проведения измерений прибор устанавливается относительно автомобиля в соответствии с требованиями ГОСТа, а оптическая камера прибора — напротив проверяемой фары на расстоянии 100... 300 мм.

Свет от фары через линзу Френеля проецируется на экран, расположенный в задней части оптической камеры и оператор может видеть картину светораспределения через специальное окно. Для удобства работы, поскольку оператор обычно стоит за прибором, оптическая камера оснащена поворотным зеркалом.

При работе с прибором оператор оценивает соответствие фактической картины светораспределения картине, требуемой ГОСТом, по разметке, нанесенной на экран. При этом перед измерением оператору необходимо выставить требуемый угол наклона светового пучка фары с помощью специальной шкалы. Сила света оценивается с помощью аналогового индикатора, расположенного на панели прибора.

9.16. Диагностика подвески и рулевого управления

В составе диагностической линии обязательно присутствует устройство для проверки состояния рулевого привода и шарнирных соединений подвески. Действующий ГОСТ рекомендует использовать прибор контроля суммарного люфта рулевого управления. Суть измерения исчерпывающе изложена в ГОСТ Р 51709—2001 — суммарный люфт проверяют на неподвижном автомобиле с ис-

пользованием приборов для определения суммарного люфта в рулевом управлении, фиксирующих угол поворота рулевого колеса и начало поворота управляемых колес. Управляемые колеса должны быть предварительно приведены в положение, примерно соответствующее прямолинейному движению, а двигатель автомобиля, оборудованного усилителем рулевого управления, должен работать. Полученная в результате данных действий информация оценивается в соответствии все с тем же ГОСТом. Суммарный люфт в рулевом управлении не должен превышать предельных значений, указанных изготовителем автомобиля в эксплуатационной документации, или, если такие значения изготовителем не указаны, следующих предельных допустимых значений:

- легковые автомобили и созданные на базе их агрегатов грузовые автомобили и автобусы — 10° ;
- автобусы — 20° ;
- грузовые автомобили — 25° .

В результате замера суммарного люфта мы получаем только самую общую информацию, не имеющую практического значения.

Полную картину состояния элементов рулевого управления, а также передней подвески, от которой в не меньшей степени зависит управляемость автомобиля, можно получить, проверив взаимные перемещения деталей рулевого привода, крепление картера рулевого механизма и рычагов поворотных цапф посредством поворота рулевого колеса относительно нейтрального положения на $40...60^\circ$ в каждую сторону и приложением непосредственно к деталям рулевого привода знакопеременной силы. Разработчики ГОСТа рекомендуют использовать для данного вида работ специальные стенды — детекторы люфтов. Они, как правило, подразделяются на два вида — пневматические и электрогидравлические с дистанционным управлением. Принцип проверки у обоих видов одинаков — к колесу автомобиля прикладываются знакопеременные силы. Лучше всего себя зарекомендовали электрогидравлические стенды. Такие стенды выпускаются разными производителями, имеют широкий модельный ряд и подразделяются на легковые и грузовые. Легковые детекторы развивают нагрузку в 11 кН, а грузовые — 30 кН. Детекторы могут быть смонтированы на платформенных электрогидравлических подъемниках ножничного типа, четырехстоечных и двухцилиндровых. Дистанционное управление детектором люфтов может быть кабельного или бескабельного (инфракрасного) типа. Все управление детектором (клавиши включения/выключения и управления движением пластин) смонтировано на пульте дистанционного управления. В него же встроен фонарь с мощной галогеновой лампой для подсветки интересующих узлов и соединений.

С детектором работать очень легко и просто — нужно всего лишь направить луч света на интересующий узел, например на

наконечник рулевой тяги, и соответствующей кнопкой симитировать поворот управляемого колеса с указанной нагрузкой. Если, например, в рулевом наконечнике люфт есть, то вы его увидите. Если же возникают какие-то сомнения, то их разрешить поможет элементарное «наложение рук» на подозрительное место.

Электрогидравлические детекторы, в свою очередь, подразделяются на два типа — с разрезными и неразрезными пластинами. Неразрезные пластины создают поперечные нагрузки, разрезные пластины имитируют поворот колеса. Изготовление данного типа детектора было обусловлено тем, что на подъемнике автомобиль можно поднимать только без человека. Некоторые фирмы выпустили детектор с разрезными пластинами для установки на смотровой канаве.

Таким образом, только детектор люфтов может позволить реально оценить состояние элементов рулевого управления и проинформировать его деффектовку.

Контрольные вопросы

1. Что является основной целью технической диагностики?
2. Назовите основные задачи технического диагностирования?
3. Что называется техническим диагностированием?
4. Что называют техническим состоянием объекта?
5. В чем заключается процедура контроля технического состояния объекта?
6. Что называется параметром отказа?
7. Какова задача прогнозирования ресурса автомобиля?
8. Что понимают под логической структурой технической диагностики?
9. Что называется чувствительностью диагностического параметра?
10. Какова организация диагностирования автомобилей в системе технического обслуживания и ремонта?
11. Какие применяются виды диагностики автомобилей?
12. Расскажите о концепции диагностирования техники в современных условиях.
13. Какие методы стендовых испытаний тормозов вы можете назвать?
14. Какой параметр рекомендуется контролировать при диагностике рулевого управления?
15. Как осуществляют управление надежностью, техническим состоянием машин по результатам диагностирования?
16. Расскажите о связи диагностики с безопасностью автомобиля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Требования к надежности — основному свойству качества технических систем — постоянно возрастают. Можно с уверенностью говорить, что при более высоком уровне надежности отечественных машин государство получит колоссальную экономическую выгоду и будут спасены многие человеческие жизни.

Следует подчеркнуть, что повышение надежности современных автомобилей является сложнейшей проблемой машиностроительного комплекса. Ее решение возможно лишь на основе системного подхода к организации и проведению исследовательских и конструкторских работ при участии высококвалифицированных специалистов.

Широкое внедрение диагностирования в основные технологические процессы технического обслуживания и ремонта автомобилей способствует ускорению научно-технического прогресса на предприятиях автомобильного транспорта. Диагностирование обеспечивает повышение качества выполняемых работ по техническому обслуживанию и ремонту путем выявления скрытых отказов и неисправностей и своевременного их устранения.

Для использования резервов повышения надежности и совершенствования системы диагностирования автомобилей необходимо решить проблему подготовки высококвалифицированных специалистов, в том числе специалистов по исследованию надежности и диагностированию технического состояния автомобилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность — государственная научно-техническая программа. Концепция и итоги работы 1991—1992 гг. : Итоги науки и техники. — / под ред. К. В. Фролова и Н. А. Махутова. — М. : ВИНТИ, 1993. — 425 с.
2. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — М. : Наука, 1969. — 462 с.
3. *Волгин В. В.* Справочник по диагностике неисправностей автомобилей / В. В. Волгин. — М. : Атласы автомобилей, 2000. — 96 с.
4. *Воронов В. П.* Международные стандарты качества серии ИСО 9000 / В. П. Воронов. — М. : Изд-во МАДИ (ГТУ), 2000. — 246 с.
5. *Гаврилов К. Л.* Справочник по диагностике и ремонту легковых и грузовых автомобилей иностранного и отечественного производства / К. Л. Гаврилов. — СПб. : Лейла, 2000. — 164 с.
6. *Герцбах И. Б.* Модели отказов / И. Б. Герцбах, Х. Б. Кордонский. — М. : Сов. радио, 1966. — 128 с.
7. *Гнеденко Б. В.* Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. — М. : Наука, 1965. — 332 с.
8. *Голуб Е. С.* Диагностирование судовых технических средств / Е. С. Голуб, Е. З. Мадорский, Г. Ш. Розенберг. — М. : Транспорт, 1993. — 150 с.
9. ГОСТ 20911—87. Техническая диагностика и контроль технического состояния изделий. Термины и определения. — М. : Изд-во стандартов, 1988. — 20 с.
10. ГОСТ 27.002—89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М. : Изд-во стандартов, 1990. — 18 с.
11. ГОСТ 27578—87. Техническая диагностика. Диагностирование изделий. Общие требования. — М. : Изд-во стандартов, 1988. — 20 с.
12. *Длин-Барковский И. В.* Теория вероятностей и математическая статистика в технике (общая часть) / И. В. Длин-Барковский, Н. В. Смирнов. — М. : Гостехиздат, 1960. — 264 с.
13. *Зорин В. А.* Надежность машин : учебник / В. А. Зорин, В. С. Бочаров. — Орел : Изд-во ОрелГТУ, 2003. — 549 с.
14. *Кубарев А. И.* Надежность в машиностроении / А. И. Кубарев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Изд-во стандартов, 1989. — 224 с.
15. *Лукинский В. С.* Прогнозирование надежности автомобилей / В. С. Лукинский, Е. И. Зайцев. — Л. : Политехника, 1991. — 268 с.
16. *Матвиенко Н. Н.* Термины ТРИЗ // Проблемный сборник. — Владивосток, 1991. — С. 25—27.
17. *Моек Е.* Техническая диагностика судовых машин и механизмов / Е. Моек, Х. Штрикерт. — Л. : Судостроение, 1986. — 232 с.

18. Основы надежности машин : учеб. пособие / [А. Л. Бараш, В. А. Зорин, В. К. Федоров, П. Н. Шерешов]. — Балашиха : Изд-во ВТУ, 2004. — 130 с.

19. *Половко А. М.* Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб. : БХВ-Петербург, 2006. — 704 с.

20. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник / под ред. В. В. Клюева. — М. : Машиностроение, 1986. — Кн. 1. — 487 с. ; Кн. 2. — 351 с.

21. *Пронилов А. С.* Параметрическая надежность машин / А. С. Пронилов. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 560 с.

22. *Романовский И. В.* Алгоритмы решения экстремальных задач / И. В. Романовский. — М. : Наука, 1977. — 352 с.

23. *Смирнов О. Р.* Надежность судовых энергетических установок / О. Р. Смирнов, Ф. Л. Юдицкий. — Л. : Судостроение, 1974. — 288 с.

24. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / [В. С. Корольюк, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин]. — М. : Наука, 1985. — 640 с.

25. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник / [Е. С. Кузнецов, А. П. Болдин, В. М. Власов и др.]. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Наука, 2004. — 270 с.

26. Техническая эксплуатация судовых газотурбинных установок / [Г. Ш. Розенберг, А. С. Бондаренко, Е. С. Голуб и др.] ; под ред. Г. Ш. Розенберга. — М. : Транспорт, 1986. — 222 с.

27. *Трунин С. Ф.* Надежность судовых машин и механизмов / С. Ф. Трунин, Л. А. Промыслов, О. Р. Смирнов. — Л. : Судостроение, 1980. — 192 с.

28. *Хенли Дж.* Надежность технических систем и оценка риска : [пер. с англ.] / Дж. Хенли, Х. Кумамото ; под общ. ред. В. С. Сыромятникова. — М. : Машиностроение, 1981. — 344 с.

29. *Шор Я. Б.* Таблицы для анализа и контроля надежности / Я. Б. Шор, Б. А. Кузьмин. — М. : Сов. радио, 1968. — 284 с.

30. *Щурин К. В.* Проблема надежности в философском аспекте // CREDO NEW : теоретический журнал. — 2002. — № 4. — С. 103—106.

31. *Яхьяев Н. Я.* Основы работоспособности технических систем : учеб. пособие / Н. Я. Яхьяев, С. Н. Яхьяева. — Махачкала : Изд-во ДагГТУ, 2007. — 118 с.

32. *Яхьяев Н. Я.* Руководство по надежности и оптимизационным задачам колесных машин : учеб. пособие / Н. Я. Яхьяев, В. П. Тынянский. — Махачкала : Изд-во ДагГТУ, 2000. — 159 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. Надежность — важнейшее свойство качества продукции	10
1.1. Качество продукции и услуг — важнейший показатель успешной деятельности предприятий транспортно-дорожного комплекса	10
1.2. Понятия «качество» и «надежность» машин	12
1.3. Надежность и общечеловеческие проблемы	17
Глава 2. Основные понятия, термины и определения, принятые в области надежности	22
2.1. Объекты, рассматриваемые в области надежности	22
2.1.1. Общие понятия	22
2.1.2. Классификация технических систем	23
2.2. Основные состояния объекта (технической системы)	24
2.3. Переход объекта в различные состояния. Виды и характеристики отказов технических систем	26
2.4. Основные понятия, термины и определения в области надежности	30
2.5. Показатели надежности	34
2.6. Критерии надежности невозстанавливаемых систем	39
2.7. Критерии надежности восстанавливаемых систем	48
2.8. Показатели долговечности	50
2.9. Показатели сохраняемости	51
2.10. Показатели ремонтпригодности	52
2.11. Комплексные показатели надежности	53
Глава 3. Сбор, анализ и обработка эксплуатационных данных о надежности изделий	56
3.1. Цели и задачи сбора информации и оценки надежности машин	56
3.2. Принципы сбора и систематизации эксплуатационной информации о надежности изделий	58
3.3. Построение эмпирического распределения и статистическая оценка его параметров	60
3.4. Законы распределения времени наработки до отказа, наиболее часто используемые в теории надежности	64
3.5. Преобразование Лапласа	73
3.6. Доверительный интервал и доверительная вероятность	81
Глава 4. Надежность сложных систем	84
4.1. Сложная система и ее характеристики	84

4.2. Надежность расчлененных систем	86
---	----

Глава 5. Математические модели надежности функционирования технических элементов и систем	112
--	------------

5.1. Общая модель надежности технического элемента	112
5.2. Общая модель надежности систем в терминах интегральных уравнений	117
5.2.1. Основные обозначения и допущения	117
5.2.2. Матрица состояний	118
5.2.3. Матрица переходов	119
5.3. Модели надежности невосстанавливаемых систем	122

Глава 6. Жизненный цикл технической системы и роль научно- технической подготовки производства по обеспечению требований ее качества	126
---	------------

6.1. Структура жизненного цикла технической системы	126
6.2. Комплексная система обеспечения качества изделия	129
6.3. Оценка уровня качества и управление надежностью	132
6.3.1. Международные стандарты качества ИСО серии 9000—2000	132
6.3.2. Контроль качества и его методы	134
6.3.3. Методы контроля качества, анализа дефектов и их причин	137
6.4. Техничко-экономическое управление надежностью изделия	139
6.5. Семь простых статистических методов оценки качества, применяемых в стандартах ИСО 9000	142
6.5.1. Классификация статистических методов контроля качества	142
6.5.2. Расслоение данных	143
6.5.3. Графическое представление данных	145
6.5.4. Диаграмма Парето	148
6.5.5. Причинно-следственная диаграмма	149
6.5.6. Диаграмма разброса	153
6.5.7. Контрольный листок	155
6.5.8. Контрольная карта	156

Глава 7. Физическая сущность процессов изменения надежности конструктивных элементов автомобилей при их эксплуатации	162
---	------------

7.1. Причины потери работоспособности и виды повреждений элементов машин	162
7.2. Физико-химические процессы разрушения материалов	164
7.2.1. Классификация физико-химических процессов	164
7.2.2. Процессы механического разрушения твердых тел	165
7.2.3. Старение материалов	166
7.3. Отказы по параметрам прочности	167
7.4. Трибологические отказы	169
7.5. Виды изнашивания деталей автомобиля	172
7.6. Отказы по параметрам коррозии	175

7.7. Диаграмма изнашивания и методы измерения износа деталей автомобилей	176
7.8. Методы определения износа деталей машин	178
7.8.1. Периодическое измерение износа	178
7.8.2. Непрерывное измерение износа	181
7.9. Влияние остаточных деформаций и старения материалов на износ деталей	182
7.10. Оценка надежности элементов и технических систем автомобилей при их проектировании	184
7.11. Наиболее распространенные способы и методы обеспечения и прогнозирования надежности, используемые при создании машин	187
Глава 8. Система технического обслуживания и ремонта машин	196
8.1. Системы технического обслуживания и ремонта машин, их сущность, содержание и принципы построения	196
8.2. Требования, предъявляемые к системе технического обслуживания и ремонта, и методы определения периодичности их проведения	200
8.3. Функционирование машины в экстремальных ситуациях	207
Глава 9. Диагностирование как метод контроля и обеспечения надежности автомобиля при эксплуатации	210
9.1. Общие сведения о диагностике	210
9.2. Основные понятия и терминология технической диагностики	213
9.3. Значение диагностики	217
9.4. Диагностические параметры, определение предельных и допустимых значений параметров технического состояния	218
9.5. Принципы диагностирования автомобилей	219
9.6. Организация диагностирования автомобилей в системе технического обслуживания и ремонта	223
9.7. Виды диагностики автомобилей	225
9.8. Диагностирование агрегатов автомобилей при ремонте	227
9.9. Диагностирование состояния цилиндропоршневой группы	229
9.10. Концепция диагностирования техники в современных условиях	231
9.11. Техническое диагностирование — важный элемент технологической сертификации услуг сервисных предприятий	232
9.12. Управление надежностью, техническим состоянием машин по результатам диагностирования	234
9.13. Диагностика и безопасность автомобиля	236
9.14. Диагностика тормозной системы	238
9.15. Диагностика фар головного освещения	242
9.16. Диагностика подвески и рулевого управления	243
Заключение	246
Список литературы	247

Учебное издание

**Яхьяев Насредин Яхьяевич,
Кораблин Анатолий Викторович**

Основы теории надежности и диагностика

Учебник

**Редактор Ю. А. Чичов
Технический редактор Н. И. Горбачёва
Компьютерная верстка: Р. Ю. Волкова
Корректор С. Ю. Свиридова**

Изд. № 101113343. Подписано в печать 13.05.2009. Формат 60 × 90/16.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Бумага офс. № 1. Усл. печ. л. 16,0.
Тираж 3 000 экз. Заказ № 8898.

Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.004796.07.04 от 20.07.2004.
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1, а/я 48. Тел./факс: (495) 648-0507, 616-0029.

Отпечатано с электронных носителей издательства.

ОАО «Тверской полиграфический комбинат», 170024, г. Тверь, пр-т Ленина, 5.

Телефон: (4822) 44-52-03, 44-50-34. Телефон/факс: (4822) 44-42-15.

Home page - www.tverpk.ru Электронная почта (E-mail) - sales@tverpk.ru

