К. В. ЩУРИН

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · МОСКВА · КРАСНОДАР
2019

УДК 656
ББК 34.41я73
Щ 98

Щурин К. В.

Щ 98 Надежность машин: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2019. — 592 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-3748-1

В книге содержатся основные сведения о концепции надёжности машин, терминологическом и математическом аппарате, физико-химических основах развития повреждающих процессов, формирующих отказы, расчетных, экспериментальных и экспертных методах для оценки, нормирования и повышения показателей надёжности сложных технических систем. Изложены основные принципы оценки и управления показателями надёжности эргатических систем, экономические, философские и социально-правовые аспекты надёжности.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов, обучающихся по техническим направлениям и специальностям, научных работников и практических специалистов предприятий промышленности и транспорта, а так же для преподавателей вузов в системе дополнительного профессионального образования и специалистов названных направлений деятельности.

УДК 656
ББК 34.41я73

Рецензенты:
В. А. БЕРШАДСКИЙ — доктор технических наук, профессор, профессор базовой кафедры техники и технологии ракетного двигателестроения Конструкторского бюро химического машиностроения им. А. М. Исаева;
А. П. ЕВДОКИМОВ — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.

Обложка *Е. А. ВЛАСОВА*

© Издательство «Лань», 2019
© К. В. Щурин, 2019
© Издательство «Лань», художественное оформление, 2019

Содержание

Введение..... 5
1. Проблема надёжности в философском аспекте..... 8
2. Основные понятия и показатели теории надёжности..... 23
2.1. Понятие и специфика проблемы надёжности..... 23
2.2. Основные объекты и состояния в надёжности машин..... 24
2.3. Основные события в надёжности машин..... 26
2.4. Основные показатели надёжности..... 29
3. Математические основы надёжности..... 36
3.1. Графическое представление
эмпирического распределения..... 37
3.2. Статистические меры случайной величины..... 39
3.3. Законы распределения случайных величин..... 42
3.4. Порядок статистической обработки данных..... 55
3.5. Суперпозиция и композиция законов распределения..... 60
3.6. Корреляционный анализ экспериментальных данных..... 71
3.7. Регрессионный анализ экспериментальных данных.
Метод наименьших квадратов..... 73
3.8. Основы анализа случайных процессов..... 75
3.9. Основы применения информационных методов
оценки и управления надёжностью..... 82
4. Повреждающие процессы и работоспособность..... 92
4.1. Изнашивание..... 102
4.2. Коррозионные разрушения..... 126
4.3. Усталость..... 147
4.4. Старение..... 205
4.5. Эрозия..... 224
4.6. Климатические факторы и показатели надёжности..... 226
**5. Испытания на надёжность и диагностирование
повреждений**..... 263
5.1. Виды испытаний..... 264
5.2. Основы планирования эксперимента..... 276
5.3. Проведение эксперимента и обработка результатов..... 315
5.4. Экспертные методы оценки надёжности..... 356
5.5. Основные методы и средства технической диагностики..... 364

6. Системные задачи надёжности мобильных машин..... 420
6.1. Применение теории графов при оценке показателей надёжности..... 421
6.2. Структурные функции технических систем..... 436
6.3. Резервирование в сложных системах..... 441
6.4. Основы надёжности эргатических систем..... 455
6.5. Ремонтопригодность и система ТО и ремонтов 484
6.6. Нормирование показателей надёжности..... 509
6.7. Экономический аспект надёжности..... 537
6.8. Правовой, социальный и организационный аспекты надёжности..... 552
Приложение А. Система стандартов для оценки и управления показателями надёжности..... 563
Приложение Б. Глоссарий надёжности..... 567
Список литературы..... 585

Введение

Проблема обеспечения надёжности – одна из первоочередных при создании и эксплуатации машин различного функционального назначения.

Их недостаточно высокие показатели надёжности влекут за собой потери, обусловленные убытками от простоев, производством чрезмерно большого количества запасных частей, повышенными затратами на все виды технических обслуживаний и ремонтов, необходимостью изготовления новых машин взамен преждевременно выведенных из эксплуатации. Все эти обстоятельства обусловливают высокую меру ответственности при разработке и реализации инженерных решений в сферах конструирования и испытаний, технологического обеспечения и производства, эксплуатации и ремонта, утилизации.

Перечисленные этапы, составляющие жизненный цикл машины, могут быть в значительной степени объединены интегральным показателем – надёжностью и проблемой её обеспечения.

Сложность этой проблемы состоит в том, что оценка надёжности и обеспечения соответствия её частных показателей нормативным может быть осуществлена после достаточно продолжительного времени испытаний и эксплуатации машин. Зачастую возникает необходимость повышения отдельных показателей надёжности – проведения процесса доработки машины, который может быть многоцикловым и продолжающимся несколько лет.

Пути сокращения периода доработки преимущественно состоят в умении прогнозировать ожидаемые показатели надёжности конструктивных элементов и машины в целом. Такие прогнозы могут быть выполнены с определённой степенью точности, постоянно возрастающей применительно к конкретным моделям серийных и массовых машин в связи с непрерывным процессом поступления дополнительной информации из сферы эксплуатации.

Надёжность машины формируется и закладывается в процессе её проектирования и изготовления, расходуется при её использовании по назначению и поддерживается путём реализации системы технических обслуживаний и ремонтов. На всех перечисленных этапах необходима организация процесса управления надёжностью машины, причем при принятии любого ответственного решения должны быть учтены его технико-экономические последствия.

Все машины одной серии, изготовленные на одном предприятии, приблизительно одинаковы по своим выходным характеристикам. Однако даже в момент выхода машины из сборочного цеха она индивидуальна по показателям надёжности своих компонентов, и индивидуальность ещё более усиливается в сфере эксплуатации. Здесь в число факторов, влияющих на надёжность, добавляются климатические условия, интенсивность и культура эксплуатации. Зачастую отказы машины обусловлены антропологическими и психологическими причинами: отключением внимания оператора, его невысокой реакцией и др. В результате при одинаковых наработках машины могут иметь существенно различное техническое состояние, а их детали и узлы – разные остаточные ресурсы.

Любой отказ любого элемента машины необходимо рассматривать во всей совокупности возможных причин его возникновения. Поэтому при решении реальных задач надёжности машин используются методы различных научных дисциплин: математики, физики, химии, теорий колебаний и упругости, механики разрушения, технологии металлов, инженерной психологии и многих других наук. Понятно, что специалист в области надёжности машин – это всесторонне образованный аналитик, поскольку предметы его анализа в большинстве случаев являются объектами междисциплинарного исследования.

Решение проблемы надёжности, безусловно, требует создания оптимальной системы нормативного регулирования, построенной по принципу «необходимо и достаточно». Система нормативных документов, созданная и достаточно эффективно функционировавшая в техносфере позднего СССР, имела мощную научную основу, нисколько не утратившую и сегодня своего значения для управления надёжностью в техническом аспекте. Система была хорошо структурирована и включала в себя сотни стандартов различных уровней, руководящих материалов и других апробированных нормативных документов. Однако в настоящее время уже нет организационных предпосылок для её эффективного применения в российской техносфере.

Будущим инженерам, исследователям и менеджерам, создающим и эксплуатирующим современные технические системы, необходимо чётко осознавать, что каждая крупица знаний, составляющих науку о надёжности машин, добыта ценой огромных потерь, измеряемых порой ценой сотен и тысяч человеческих жизней. Именно поэтому каждое новое знание, отражающее приращение опыта социума

в техносфере, должно быть оформлено в нормативном документе высокого уровня. Процесс эволюции нормативно-технической документации связан с анализом новой информации о показателях надёжности, созданием программ и методик всех видов испытаний, технических регламентов и стандартов различного уровня, руководящих технических материалов, инструкций и др.

Библиография публикаций научно-исследовательского и прикладного направлений в области надёжности технических систем содержит сотни наименований. В то же время список учебной литературы весьма ограничен.

Целью предлагаемой книги является как можно более полное решение этой проблемы. Основываясь на опыте преподавания курса «Надёжность технических систем» в ряде вузов, в том числе для различных форм дополнительного профессионального образования руководителей и специалистов промышленности и транспорта, автором предпринята попытка изложить в компактной и доступной форме основные сведения, составляющие предмет теории и практики надёжности технических систем различного функционального назначения.

Автором широко использованы результаты собственной практической деятельности в сфере управления надёжностью сложных технических и эргатических систем, полученные в процессе реализации целевых НИОКР.

Учитывая универсальность основных положений науки о надёжности, приведённые здесь теоретические выкладки проиллюстрированы примерами из различных областей техники.

1. Проблема надёжности в философском аспекте

Актуальность философского исследования методологических, научно-технических и социальных проблем надёжности машин очевидна, поскольку без этого невозможна разработка методологии развития современной техники и в первую очередь анализа соответствия закономерностей развития техники законам живой природы.

Надёжность – это комплексный фактор, объективно присущий всем материальным системам и дающий возможность устанавливать оптимальную меру соотнесенности рабочих процессов и выходных характеристик системы с её функциональным значением. Надёжность – это качество, распределённое во времени.

Любые технические устройства всегда изготавливались в расчёте на некоторый достаточный для практических целей период экономически эффективного использования. Однако долгое время надёжность не измерялась количественно, что значительно затрудняло её объективную оценку. Для оценки надёжности использовались такие понятия, как высокая надёжность, низкая надёжность и другие качественные определения. Установление количественных показателей надёжности и способов их измерения и расчёта положило начало научным методам в исследовании надёжности.

В нашей стране проблема надёжности машин в концептуальном аспекте впервые была выдвинута и обсуждена на сессии Академии наук СССР в 1934 г. На первых этапах развития теории надёжности основное внимание сосредотачивалось на разработке методик по сбору и обработке статистических данных об отказах изделий. В оценке надёжности преобладал характер констатации количественных характеристик потока отказов на основании этих статических данных. Развитие теории надёжности сопровождалось совершенствованием вероятностных методов исследования, как то: определение законов распределения наработки до отказа, разработка методов расчёта и испытаний изделий с учётом случайного характера отказов и т. п.

Вместе с тем возникли новые направления исследований: поиск принципиально новых способов повышения показателей надёжности; прогнозирование возникновения отказов и прогнозирование количественных показателей надёжности; анализ физико-химических процессов, оказывающих влияние на надёжность; установление корреляционных связей между характеристиками этих процессов и показателями надёжности; совершенствование методов расчёта показателей

надёжности изделий, обладающих все более сложной структурой, с учётом все большего числа действующих факторов (достоверность исходных данных, контроль и профилактика, условия работы и обслуживание и др.). Испытания на надёжность совершенствовались главным образом в направлении проведения ускоренных и неразрушающих испытаний. Наряду с совершенствованием натурных испытаний широкое распространение получили математическое моделирование и сочетание натурных испытаний с моделированием. В результате в середине XX в. сформировались основы общей теории надёжности и её частных направлений по отдельным видам техники.

Увеличивающаяся сложность технических устройств, возрастающая ответственность выполняемых ими функций, повышение требований к качеству изделий и условиям их работы, возросшая роль автоматизации управления техническими системами – основные факторы, определяющие главное направление в развитии науки о надёжности. Машины становятся всё более сложными, количество элементов во многих из них исчисляется десятками и сотнями тысяч. Если не принимать специальных мер по обеспечению надёжности, то любая машина практически будет неработоспособной.

Круг вопросов, входящих в компетенцию теории надёжности, на наш взгляд, наиболее полно сформулировал академик А. И. Берг: «Теория надёжности устанавливает закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности системы и её элементов, рассматривает влияние внешних и внутренних воздействий на процессы в системах, создает основы расчёта надёжности и предсказания отказов, изыскивает способы повышения надёжности (при конструировании и изготовлении систем и их элементов, а также способы сохранения надёжности при эксплуатации)».

Всякая система – живая или неживая, детерминированная или вероятностная, обладает определённой структурой. При этом человек сам, являясь конструкцией, доведенной Природой до определённой степени совершенства, создает технические системы «под себя как себя». В процессе поиска оптимальных путей решения проблем надёжности в технике одним из основных является вопрос о взаимосвязи структуры и функции. По особенностям структуры любой конкретной системы практически всегда можно сделать вывод о выполняемой ею функции. В основе надёжного функционирования как биологических, так и технических систем лежат принципы структурной и функциональной избыточности: феномен избыточности,

наблюдаемый в живой природе и моделируемый человеком в технических устройствах, является выражением единства структуры и функции.

Структурно-функциональное различие систем востребовало понятия сложности (уровня сложности) систем и разработки принципов их иерархической организации.

Границы использования принципа избыточности устанавливаются с помощью экономических критериев, поскольку неосторожное использование этого принципа приводит к недопустимому увеличению размеров, веса, стоимости и других показателей, вследствие чего повышение показателей надёжности системы влечёт за собой снижение других показателей технического уровня. Оптимизация количественных характеристик избыточности и надёжности базируется, таким образом, на идеях, составляющих сущность категорий качества, количества и меры, подчиняясь закону перехода количественных изменений в качественные и обратно, а также закону единства и борьбы противоположностей.

Взаимное отрицание надёжности технической системы и других показателей её технического уровня является движущей силой, определяющей направление и темп развития конкретного класса конструкций и его инфраструктуры, включая социальную. Отметим, например, тесную корреляционную связь между развитием конструкций транспортных средств и изменением системы социально-экономических приоритетов людей.

Потребность обсуждения и развития темы надёжности машин по всем смысловым признакам совокупности причинно-следственных связей идентична потребности обсуждения проблемы здоровья людей. Как здоровью противопоставлена болезнь, так надёжности противопоставлены нарушения (отказы). Диалектика понятий надёжности и нарушения характеризует их отношения и взаимодействия, которые проявляются во всех случаях реальной действительности: неизбежность нарушения заложена в природе вещей. Флуктуации, являющиеся результатом дискретности строения вещества и статистической природы ряда величин социального, конструктивно-технологического, физико-химического, эксплуатационного и других свойств, принципиально не устранимы. В живых организмах идеально нормального состояния не бывает. Однако, в отличие от технических систем, биологические способны восстанавливать нарушение функции и предупреждать возможные нарушения.

Функцию адаптации биологических систем выполняет нервная система, в том числе её элементы – нейроны. В технических системах аналогичную функцию призваны выполнять встроенные системы бортовой диагностики, которые либо сигнализируют оператору о нарушениях, либо через автоматические системы обратной связи подают сигнал соответствующим исполнительным устройствам на устранение нарушения.

Выбор путей рационального решения фундаментальной проблемы надёжности осуществляется с позиции единства детерминистского, вероятностного и эвристического подходов и зависит от природы объекта познания и уровня развития наук и технологий, являющихся инструментом познания первичного объекта.

Теория надёжности развивается в тесном взаимодействии и сотрудничестве с математикой: с одной стороны, математический аппарат широко используется для решения задач надёжности технических систем, с другой стороны, практика решения проблем надёжности ориентирует и стимулирует развитие самой математики.

Центральное место в использовании математического аппарата для решения проблем надёжности занимают процессы обработки данных и принятия решений. При этом в соответствии с поставленной задачей исследования, как правило, необходима идеализация реальной технической системы, в ходе которой её свойства абстрагируются и отождествляются со свойствами математических объектов, в результате чего исследователь синтезирует математическую модель технической системы. Успешное решение этой задачи в значительной мере определяется опытом и интуицией исследователя, но в то же время необходимо указать и общие требования, предъявляемые к математической модели: стандартная форма, необходимая и достаточная точность при предельной простоте.

Моделирование компонентов системы, как правило, значительно проще, чем моделирование системы в целом, поскольку, несмотря на огромное разнообразие систем, набор их компонентов весьма ограничен, и стандартизированные модели различных компонентов, полученные однажды, могут затем многократно использоваться при моделировании сложных систем.

Математику в зависимости от её точки зрения на моделируемый объект подразделяют на метаматематику, формальную математику, содержательную математику и прикладную математику. Из перечисленных разделов два последних используются в качестве математиче-

ского аппарата теории надёжности, поскольку предметом содержательной математики являются системы абстрактных объектов, наделённых конкретным содержанием и называемых конструктами, а прикладная математика истолковывает объекты формальных и содержательных теорий в категориях реального мира (эмпирическая интерпретация).

Параметры системы и приложенные к ней воздействия в зависимости от их реальной природы интерпретируют в виде детерминированных или статистических моделей. Последние имеют особо важное значение при исследовании сложных систем с большим количеством связей, обладающих трудно учитываемыми свойствами. Теория надёжности основывается на вероятностно-статистической природе самого феномена надёжности. Из множества состояний, в которых может находиться система, выделяется подмножество состояний, различающихся между собой с точки зрения показателей надёжности. Это подмножество называют фазовым пространством надёжности системы, изменяющимся в процессе её эксплуатации.

Ключевой категорией и объектом информационных методов является ***энтропия.*** Понятие энтропии было введено Рудольфом Клаузиусом в 1865 г. в работе «Сочинения по теории теплоты». В этой фундаментальной работе автором было сформулировано второе начало термодинамики, согласно которому переход теплоты от более холодного тела к более теплому не может происходить без затраты внешней энергии. Таким образом, процесс превращения теплоты в работу подчинён определённой физической закономерности, которую можно выразить математически, если ввести особую функцию состояния – энтропию или меру необратимого рассеяния энергии.

Ввиду того, что понятие энтропии первоначально вводилось исключительно для использования в области физики и других естественных явлений, потребовалось время для установления связи между термодинамической энтропией как величины, характеризующей процессы перехода тепловой энергии в механическую, и энтропией как мерой неопределённости.

В начале XX в. была выдвинута гипотеза о том, что вся материя обладает свойством отражения. Развивая эту гипотезу, учёные обратили внимание на связь понятий информации и отражения и пришли к выводу, что информация по отношению к отражению занимает такое же место, как энергия по отношению к движению, т. е. информация представляет собой качественную и количественную характери-

стики степени организованности отражения. Отличие информации от отражения заключается в том, что информация возникает на определённом уровне организации материи и передается посредством знака отражения – сигнала. По определению академика В. Н. Глушкова, информация – это мера неоднородности распределения материи и энергии в пространстве и во времени.

Таким образом, основные идеи теории информации вырастают из понятия беспорядка или энтропии в термодинамике и статистической физике. Информация всегда выступает как методологическая основа для обобщения, упрощения, оптимизации и управления. Хотя существует много трактовок понятия информации, до настоящего времени не имееется единого определения этого понятия. Наиболее общее и непротиворечивое определение информации можно дать, исходя из другого важного системного понятия – организованности. Организованность – относительное понятие, рассматриваемое в отношении какого-либо базиса (эталона, порядка, цели).

Первые попытки количественного измерения информации были предприняты в 1928 г. Р. Хартли, который предложил основополагающие идеи использования комбинаторного и вероятностного подходов в теории информации.

Информация в точно определённом смысле впервые была введена в статистике Р. Фишером, а в 1948 г. К. Шеннон и Н. Винер независимо друг от друга опубликовали работы, в которых предложили логарифмические меры информации для использования в теории связи. В статье «Математическая теория связи» основоположника теории информации Клода Элвуда Шеннона термин «энтропия» впервые использован как количественная характеристика, мера неопределённости, связанная со случайными событиями. К. Шеннон предложил трактовать и измерять информацию в математическом смысле, сводя её к выбору между двумя значениями, или двоичными разрядами, – «да» или «нет». Математическая теория энтропии, в основу которой легли фундаментальные работы К. Шеннона, была создана выдающимися советскими математиками А. Н. Колмогоровым, А. Я. Хинчиным, И. М. Гельфандом и др. Теория энтропии постоянно развивается и является ярким примером плодотворного воздействия прикладных задач на развитие фундаментальных направлений математики.

Труды К. Шеннона, Н. Винера и их последователей стали фундаментальной основой современной вычислительной техники, циф-

ровых средств связи, радиотелекоммуникаций, мощно стимулировали исследования по прикладным проблемам теории информации в различных отраслях, в том числе – теории надёжности. Применение феномена энтропии к динамическим системам А. Н. Колмогоровым и Я. Г. Синаем привело к решению ключевых проблем эргодической теории, к введению понятия инвариантных динамических систем и уточнению некоторых положений классической статистической механики.

Универсальность понятий «информация» и «энтропия», являющихся мерами организованности и взаимной связи, жесткая необходимость квантования, связь с классической термодинамикой дают основания полагать, что методы математической теории информации являются не просто полезными абстрактными моделями, но и адекватными моделями объективной реальности.

Сложившееся состояние теории информации, её прикладные возможности определили основную концепцию информационного обеспечения управления качеством – использование в качестве математического аппарата системы управления качеством массового автоматизированного производства единой базы – теории информации.

В 2001 г. впервые в теории и практике машиностроения коллективом российских учёных (В. Г. Григорович, С. В. Юдин, Н. О. Козлова, В. В. Шильдин) создана единая математическая база для анализа и управления качеством технологических процессов на основе информационных методов.

Основой моделирования технических объектов является системный подход. При построении конкретных моделей понятия философского и общенаучного уровней, как правило, трудно формализуемы и отображаются качественными связями, а понятия конкретного и специализированного уровней – формализуемы и отображаются количественными соотношениями. Системный подход базируется на использовании соответствующих законов и категорий диалектики – часть и целое, содержание и форма, качество и количество и др.

При их использовании необходимо учитывать:

– неадекватность иерархического представления целого как совокупности частей может привести к утрате понимания целого;

– систему необходимо рассматривать во всей её сложности с учётом относительной самостоятельности составляющих элементов и их связей, поскольку последние могут иметь свои особенности, непосредственно не совпадающие с основным назначением системы;

– изучение системы должно опираться на знание свойств составляющих её элементов и их связей;

– в процессе развития системы неизбежно возникают противоречия между формой и содержанием;

– форма, соответствующая содержанию, ускоряет его развитие, несоответствующая – тормозит;

– конкретная техническая система является равнодействующей, определяющей единство качества и количества;

– структура системы концентрирует её свойства, изменение которых может иметь скачкообразный характер;

– изменение элементов структуры или их возможных соотношений и связей может приводить к появлению новых свойств.

Система и цель находится в определённом соответствии. Улучшение характеристик конкретной системы, обеспечивающей высокую эффективность достижения цели, может оказаться неэффективным для обеспечения этой же цели. Здесь же подчеркнем, что оптимизацию структур технических систем по определению невозможно осуществлять без учёта основного события теории надёжности – отказа, природа которого исчерпывающе описывается законом возрастания энтропии, или потерей упорядоченности структур.

Человек, осознавая чрезвычайно ограниченную продолжительность собственного жизненного цикла, на уровне подсознания опасается разрушений. Поэтому большинство людей цепко и упорно держатся за мысль, что любые конструкции, лично с ними связанные, вообще не должны разрушаться. Тоска по бессмертию, потенциально существующая в каждом человеческом сердце, легко пробуждается, часто превращаясь в духовную позицию отдельного человека или даже целой цивилизации. Попытки специалистов поведать обывателям о том, что сущность проблемы надёжности состоит в определении вероятности «дожития» системы до приемлемого нами возраста, почти всегда заканчиваются неудачно. Предпринимая ещё одну такую попытку, приведём блестяще изложенную суть надёжности, цитируя фрагмент книги профессора Джеймса Э. Гордона «Конструкции, или Почему не ломаются вещи»: «Весь окружающий мир можно рассматривать как огромную энергетическую систему: величественный рынок, где одна форма энергии по определённым ценам и правилам неминуемо переходит в другую. Энергетически предпочтительное обязательно произойдет. В этом случае каждая конструкция существует лишь для того, чтобы отдалить что-то неизбежное, энергетиче-

ски выгодное. Так, поднятый груз должен упасть, упругая энергия – выделиться. Задача конструкции – отложить это событие на год, на век или на тысячелетие. В конечном итоге все сооружения будут разбиты или разрушатся сами, так же как и всем нам в конце концов суждено умереть. Отложить это на некий приличный срок – задача медиков и инженеров.

Весь вопрос заключается в том, каков же этот „приличный срок“. Каждая конструкция должна быть надёжной в течение определённого времени службы. Для ракеты это могут быть несколько минут, для автомобиля или самолета – 10–20 лет, для собора – тысячелетия».

Иллюстрируя сказанное конкретными законами физики и химии, отметим, что эволюция энергии при развитии повреждающих процессов, определяющих надёжность, исчерпывающе описывается законами термодинамики: первый закон утверждает неуничтожаемость энергии, второй – указывает направление развития процессов. Согласно принципам термодинамики, мерой преобразования и изменения энергии тела (системы тел) служит энтропия, приращение которой определяется по формуле

$$\Delta S = \Delta S_{o} + \Delta S_{н},$$

$$\Delta S_{o} > 0,\ \Delta S_{o} < 0,\ \Delta S_{н} \geq 0,$$

где ΔS_{o} – изменение энергии тела в результате обмена веществом и энергией с внешней средой; $\Delta S_{н}$ – изменение энергии тела в результате необратимого преобразования, вызываемого течением физико-химических процессов и преобразования одних видов энергии в другие.

Это соотношение есть формулировка второго закона термодинамики, данная И. Пригожиным.

Проблема жизни и смерти биологических, биотехнических и технических систем – волнующая философская проблема. При её обсуждении на протяжении многих веков сформировались два взаимно отрицающих друг друга направления.

Первое, представленное Ф. Энгельсом, Б. Стреллером и др., рассматривает смерть как существенный момент жизни и считает, что отрицание жизни по существу содержится в самой жизни. Подтверждением такой позиции можно считать то, что обмен веществ, являясь основой жизни биосистем, одновременно отравляет организмы

своими продуктами. Сторонники первого направления часто цитируют знаменитый силлогизм традиционной логики Сократа: «Все люди смертны. Сократ человек, следовательно, Сократ смертен».

Философы, представляющие второй подход – М. В. Волькенштейн, К. Ламонт, К. С. Тринчер и др., – считают, что в живой природе как минимум на уровне клетки и одноклеточных организмов существует бессмертие. «Вся цепь животной жизни, тянущаяся сотни миллионов лет, – считает К. Ламонт, – фактически представляет собой нерушимый континуум бессмертной протоплазмы».

Мы полагаем, что переносить на технические системы утверждения, представленные в рамках второго направления, в чистом виде нецелесообразно. В то же время, рассматривая технические системы, например машины, как сложные системы, состоящие из «клеток» (стандартных деталей – валов, зубчатых колес, подшипников и др.), можно говорить о квазибессмертии проверенных веками технических решений, воплощенных в стандартные элементы машин. Ограничиваясь этим осторожным утверждением, в более широком аспекте обсуждения проблемы бессмертия, на наш взгляд, следует согласиться с мнением Г. Ферстера: «…максимальная устойчивость – бессмертие – ведет к застою и кладет конец эволюции». Поэтому в настоящее время доминирующим стал принцип обеспечения необходимого ресурса технических систем с установленной вероятностью неразрушения, то есть обеспечения необходимой и экономически целесообразной надёжности. Таким образом, сегодня процессы старения технических систем выражаются как объективная реальность, и потребители ожидают от конструкторов и технологов, прежде всего машин, приспособленных в пределах их жизненного цикла к компенсации отрицательных процессов старения, – машин с саморегулирующимися передачами, самосмазывающимися подшипниками, самоочищающимися фильтрами и т. д.

В основу анализа состояния технических систем в период их эксплуатации и старения профессором А. И. Селивановым положено понятие годности как обобщённой характеристики служебных свойств. Другие же исследователи, например профессор Л. В. Дехтеринский, используют для этих же целей термин «потенциал работоспособности». Нам более близок второй термин, поскольку он несет более высокую смысловую нагрузку и дидактически наиболее адекватно соответствует энергетической сущности процессов старения.

С этих позиций жизненный цикл технической системы (как и человека) можно представить как процесс непрерывного снижения потенциала работоспособности, периодически восстанавливаемого до приемлемого уровня путём реализации системы технических обслуживаний и ремонтов.

Снижение потенциала работоспособности машин главным образом связано с накоплением необратимых повреждений в их элементах. Повреждения могут иметь механическое, физическое, химическое происхождение или являться их комбинацией. Обычно повреждающие процессы, имеющие различную природу, рассматривают раздельно, несмотря на то, что в общем случае они описываются с позиций второго закона термодинамики одними и теми же или очень близкими математическими соотношениями. Общий подход к описанию процессов накопления повреждений предложен профессором В. В. Болотиным и является основой для использования полуэмпирических моделей в расчётах, связанных с прогнозированием долговечности технических систем. При непрерывном времени мера повреждения оценивается путём решения дифференциального уравнения в виде функционала вектора нагрузок, включающего силовые, деформационные, трибологические, температурные, химические и другие воздействия, влияющие на скорость выработки ресурса. Однако в ряде случаев процесс накопления повреждений с необходимой и достаточной точностью может быть описан с использованием линейных зависимостей и дискретного времени.

Потенциал работоспособности технических систем условно складывается из трех частей: активной, пассивной и резервной.

Закономерности выработки активной части потенциала работоспособности являются предпосылкой и исходными данными для разработки системы технических обслуживаний и ремонтов.

Пассивная часть в пределах срока службы полагается неизменной. Резервная часть образуется в результате избыточности, закладываемой в конструкцию. На практике резервная часть образуется путём назначения различных коэффициентов запаса, использованием резервирования (дублирования) «ненадёжных» элементов конструкции и т. д. Резервную часть потенциала работоспособности можно условно представить состоящей из двух частей:

– первая часть формируется на базе «современного уровня незнания» свойств материалов, конструктивных связей, закономерностей протекания повреждающих процессов;

– вторая часть назначается для формирования живучести технических систем – обеспечения их работоспособности в течение определённого времени после выработки активной части потенциала работоспособности или отказов критического характера; точно так поступает и Природа, «проектируя» биосистемы.

С развитием эволюционной генетики явления наследственности стали рассматриваться не только как фактор эволюции, но и как объект эволюционных преобразований. Биологическая наука осмысливает проблему эволюции самих явлений наследственности и процессов изменчивости.

Применительно к техническим объектам степень наследственности признаков определяется коэффициентом унификации, являющимся мерой конструктивной преемственности в процессе эволюции технических систем. Поскольку унификация в первую очередь предусматривает использование в новых моделях технических систем конструктивных элементов, узлов и агрегатов, используемых в существующих моделях, то прогнозирование показателей надёжности новых моделей с высоким коэффициентом унификации существенно облегчается.

Процессы изменчивости в эволюции технических систем обуславливаются прежде всего научно-техническим прогрессом в смежных отраслях. Так, например, развитие электроники предопределило постепенное прекращение использования карбюраторов в системах питания двигателей внутреннего сгорания с их заменой на мехатронные системы впрыска. В таких случаях показатели надёжности определяются с помощью системы испытаний.

Показатели надёжности той или иной системы в преобладающей степени формируются путём многокритериальной оптимизации, обеспечивающей рациональное сочетание факторов наследственности и изменчивости с учётом эксплуатационно-климатических, социальных, антропологических и других факторов.

Среди перечисленных факторов наиболее интересным в философском аспекте является, на наш взгляд, социальный фактор. Современные технические системы нельзя рассматривать изолированно не только от человека – оператора, потребителя продукции, пассажира и т. п., но и от социума в целом. Историческими фактами, неоднократно подтверждавшимися, является тесная корреляционная связь между устойчивостью социально-политических систем и техническими революциями: вспомним лишь континентальные социальные

потрясения, связанные с появлением паровых машин, или глобальные, связанные с развитием современных информационных систем. Здесь необходимо подчеркнуть, что в данных взаимосвязях можно рассматривать лишь системы, достигшие высокого технического уровня (в первую очередь – показателей надёжности) для конкретного этапа развития общества. Нам представляется, что на сегодняшний день философия, социология, история естествознания и техники ещё не сформировали научных школ, способных дать социально-политическую оценку пионерским техническим решениям во всей глубине многофакторных взаимосвязей. Существенно более изученными являются вопросы взаимодействия человека-оператора и технических объектов.

Научно-техническая революция привела к появлению во второй половине XX в. нового класса систем – эргатических, структурной частью которых является человек-оператор. В контексте эргатических концепций основными особенностями деятельности человека-оператора полагаются:

– субъект труда – человек-оператор находится не непосредственно у объекта труда, а контроль и управление объектом осуществляются с помощью органов управления и использованием его информационной модели;

– в процессе управления человеку-оператору приходится решать задачи, возникновение которых нельзя предвидеть.

Обеспечение надёжности системы «человек – машина», является главной задачей инженерной психологии; при этом уже не подвергается сомнению, что определяющее значение имеет надёжность человека-оператора. Ключевой эргатический фактор состоит в том, что, управляя современными техническими системами, оператор постоянно взаимодействует не с управляемыми объектами, а с их информационными моделями.

Недостатки, препятствующие человеку быть идеальным оператором, хорошо известны: недостаточная скорость и точность выполнения операций, быстрая утомляемость, подверженность влиянию разнообразных субъективных факторов. Однако возможности человека, связанные с огромной интеллектуально-психологической пластичностью и самокомпенсацией, способностью творчески изменять схемы действий, избирательной самообучаемостью и интуицией, дают ему те преимущества, которые вряд ли будут достигнуты кибернетическими системами в обозримом будущем. Более того, совер-

шенствование автоматизации управления не только не приводит к исключению человека из управленческих процессов, но, напротив, к усложнению его труда, поскольку физические функции человека в процессе производства и управления всё более уступают место интеллектуальным и социальным.

В этой связи всё большее значение придается проблеме моральной надёжности личности, занимающей сегодня видное место в психологических и философско-социальных исследованиях. Степень личной ответственности человека, определяющая её надёжность, с учётом его индивидуальных особенностей и обстоятельств личной жизни, решающим образом зависит от социальной и нравственной атмосферы общества, вызывая ощущения уверенности или неудовлетворенности, нужности или ненужности. Определённые сочетания этих факторов могут являться причиной управленческих действий оператора, направленных на использование объекта управления как орудия уничтожения. Свидетелями этому мы, к сожалению, часто являемся в последнее время.

Моральная надёжность человека, неотделимая от моральной ответственности, охватывает всю совокупность человеческих проявлений и прямо зависит от моральной надёжности общества – его устройства, идеалов и устремлений, политики.

Профессиональное мастерство оператора оказывает заметное, а порой и решающее влияние на надёжность управляемого технического объекта. При этом эффективный по обеспечению надёжности стиль управления во многом формируется путём оптимально-целевой организации профессионального обучения и переподготовки.

В рамках эргатических концепций выделяют следующие этапы процедуры обучения:

– первоначальная адаптация человека к режиму работы в составе конкретной системы человек – техника; на этом этапе формируется структура деятельности обучаемого;

– отработка параметров структуры, в пределах которых обучаемый знает, что и в какой последовательности следует выполнять, но действия его недостаточно точны и своевременны;

– достижение статистически стабильного уровня сформированных в процессе обучения навыков;

– формирование устойчивых навыков дополнительными циклами обучения.

Вероятность наступления события «Ошибка управления» в пределах предложенной классификации циклов обучения (профессиональной готовности оператора) может различаться согласно опубликованным данным в 6–10 раз. Попытки выделить значимые профессиональные качества, необходимые, например, хорошему водителю, привели к составлению перечня из 50 наименований, что, казалось бы, предполагает очень большой разброс профессиональных характеристик у разных людей. В действительности этого не происходит, поскольку обучение и последующее накопление профессионального опыта не только улучшает показатели качества работы, но и уменьшает их рассеивание.

Технический объект – оператор – сфера эксплуатации представляют собой части объективно существующего единого целого. Гораздо проще и удобнее рассматривать избирательно и изолированно один из элементов этой системы, тем более что понятиями и категориями надёжности можно охарактеризовать каждый элемент. Однако надёжность системы в целом отличается от частных показателей надёжности её элементов вследствие наличия коррелированных внутриэлементных, межэлементных и межсистемных связей. Искусство аналитика – исследователя надёжности различных систем, содержащих технические объекты, для решения задач различного уровня состоит в ограничении количества связей различного уровня: другими словами, разработки граничных условий информационных моделей систем.

Изучение природы надёжности с диалектических позиций необходимо сегодня, поскольку мы с сожалением констатируем, что возрастает количество публикаций, культивирующих воззрения, согласно которым надёжное функционирование сложных технических систем достигается благодаря неким нематериальным силам. Такие «научные труды» опасны тем, что они формируют неадекватную систему профессиональных ориентиров для студентов и молодых специалистов в области технических наук. Поэтому философская интерпретация основных явлений в технической сфере с материалистических позиций представляется остро необходимой.

В исследуемом поле проблем систематизация и обобщение известного материала являются решением лишь частной проблемы. Основной целью философского осмысления является анализ ещё не решенных проблем с тем, чтобы побудить исследователей к их решению, максимально исключая эмпирический принцип проб и ошибок.

2. Основные понятия и показатели теории надёжности

2.1. Понятие и специфика проблемы надёжности

Надёжностью называют свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Теория надёжности позволяет наряду с анализом и обеспечением частных мер избыточности (различные коэффициенты запаса прочности, устойчивости и др.) обосновывать интегральные разновидности избыточности – функциональную, временную и структурную. С этим связан ряд специфичных направлений теории надёжности, которые, собственно, и формируют её научную концепцию:

– оценка с заданной погрешностью наработки до наступления отказа технической системы на любом её структурном уровне, что обуславливает необходимость всеобъемлющего анализа и синтеза закономерностей функционирования элементов машин и их сочетаний;

– формирование информационных и нормативных баз данных о физико-химических процессах, обуславливающих накопление повреждений;

– оценка влияния эргатических (человеко-машинных) и социальных факторов на процессы, приводящие к отказам;

– формирование баз данных об эксплуатационной инфраструктуре машины и её влиянии на процессы накопления отказов;

– накопление и анализ информации из сфер эксплуатации и ремонта машин;

– формирование необходимого математического аппарата и разработка численных методов для моделирования и решения перечисленных выше специфических проблем теории надёжности;

– формирование банка данных о прогрессивных конструктивно-технологических решениях, методах эксплуатации, ремонта и восстановления для распространения на парк машин одинаковых или близких моделей.

Особенностью проблемы надёжности является её связь со всеми этапами проектирования, изготовления и эксплуатации объекта, начиная с момента формирования и обоснования идеи его создания и заканчивая принятием решения о списании.

При проектировании и расчёте объекта его надёжность ***закладывается***. Она зависит от конструкции объекта и его узлов, применяемых материалов, методов защиты от вредных воздействий, приспособленности к ремонту и обслуживанию и других конструктивных особенностей.

При изготовлении объекта его надёжность ***обеспечивается***. Она зависит от качества изготовленных деталей, методов контроля выпускаемой продукции, возможностей управления ходом технологического процесса, от качества сборки объекта и его узлов, методов испытаний готовой продукции и других показателей технологического процесса.

При эксплуатации объекта его надёжность ***реализуется***. Она зависит от методов и условий эксплуатации объекта, принятой системы его технического обслуживания и ремонта, режимов работы и других эксплуатационных факторов.

Теория надёжности, как и всякая прикладная теория, базируется на фундаментальных математических и естественных науках.

Базу науки о надёжности технических систем составляют:

– ***математические методы теории надёжности***, включающие в основном теорию вероятностей и математическую статистику, методы оптимизации, теорию информации и математическую логику и др.;

– ***теория повреждающих процессов***, изучающая физико-химические процессы, приводящие к потере при эксплуатации объекта начальных свойств, прежде всего триботехнические процессы, усталость, коррозию, эрозию и старение;

– ***прикладные методы обеспечения надёжности*** в областях расчёта, проектирования, технологии изготовления, эксплуатации и ремонта объектов изучаемого типа.

2.2. Основные объекты и состояния в надёжности машин

Основные понятия и термины теории надёжности стандартизованы. В ней рассматриваются следующие обобщенные объекты.

Изделие – единица продукции, выпускаемая предприятием, которая может состоять из одной детали или совокупности деталей, например, машина, механизм, агрегат, прибор и т. д.

Элемент – составная часть изделия, предназначенная для выполнения его определённых функций.

Система – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций, например, несущая система, система управления и др.

Для однозначности формулировок ***объектом*** будем определять понятие, обобщающее в себе элемент, систему и изделие.

Объекты подразделяются на ***невосстанавливаемые***, для которых проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и/или конструкторской документации, и они подлежат замене (радиоэлементы, микросхемы, уплотнительные кольца, подшипники качения и т. п.), и ***восстанавливаемые***, для которых такое восстановление предусмотрено (автомобиль, самолет, корабль). Ряд изделий, относимых к невосстанавливаемым, например подшипники, иногда восстанавливаются, но не потребителями, а на специализированных предприятиях.

Надёжность объектов характеризуется перечисленными ниже основными состояниями.

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

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

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

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации. При этом для сложных объектов из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. При этом критериями предельного состояния являются признак или совокупность признаков, установленные нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документацией.

2.3. Основные события в надёжности машин

В надёжности машин основными событиями являются:

– ***повреждение*** – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния;

– ***отказ*** – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Поскольку основным предметом теории надёжности является прогнозирование и обеспечение работоспособности технических систем, дальнейший анализ будет проведен применительно к отказам.

Отказы подразделяются на ***отказы функционирования***, при которых выполнение функций объектом прекращается (поломка зубьев шестерни КПП), и ***параметрические,*** при которых хотя бы один параметр объекта изменяется в недопустимых пределах (снижение КПД передачи, точности измерительного прибора и т. д.).

Причины отказов подразделяются на случайные и систематические. ***Случайные причины*** – это непредусмотренные перегрузки, дефекты материала и погрешности изготовления, не обнаруженные контролем, ошибки обслуживающего персонала и разного рода нештатные ситуации, например, наезд автомобиля на препятствие. ***Систематические причины*** – это закономерные явления, вызывающие постепенное накопление повреждений и отказов. Это коррозия, старение, усталость, ползучесть, изнашивание, эрозия, т. е. повреждающие (деградационные) процессы.

Отказы классифицируют по признакам, приведенным в таблице 2.1.

По своим последствиям отказы могут быть ***легкими*** – легкоустранимыми, ***средними*** – не вызывающими разрушений других узлов, и ***тяжелыми*** – вызывающими вторичные разрушения или жертвы.

Таблица 2.1 – Классификационные признаки отказов

Термин	Определение
Ресурсный отказ	Отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния
Независимый отказ	Отказ, не обусловленный другими отказами
Зависимый отказ	Отказ, обусловленный другими отказами
Внезапный отказ	Отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта
Постепенный отказ	Отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта
Сбой	Самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора
Перемежающийся отказ	Многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера
Явный отказ	Отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению
Скрытый отказ	Отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики
Конструктивный отказ	Отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и/или норм проектирования и конструирования
Производственный отказ	Отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии
Эксплуатационный отказ	Отказ, возникающий по причине, связанной с нарушением установленных правил и/или условий эксплуатации
Деградационный отказ	Отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и/или норм проектирования, изготовления и эксплуатации

По возможности дальнейшего использования объекта отказы подразделяют на ***полные***, исключающие использование объекта до устранения отказа, и ***частичные***, при которых объект может ограниченное время использоваться, например транспортное средство на пониженной скорости.

Отказы также делятся на ***устранимые***, причины возникновения которых известны и могут быть полностью устранены, что исключает

их возникновение при дальнейшей эксплуатации, и ***неустранимые***, причины возникновения которых не могут быть устранены для объектов данного вида. В свою очередь устранимые отказы подразделяются по сложности устранения на устранимые в порядке технического обслуживания, в порядке среднего и капитального ремонта и по месту.

По времени возникновения отказы делятся на ***приработочные***, возникающие в первый период эксплуатации и связанные с отсутствием приработки и с попаданием на сборку дефицитных элементов, не отбракованных контролем; ***при нормальной эксплуатации***, характеризуемой практически постоянной или незначительной изменяющейся интенсивностью отказов, и ***износовые***.

Названным временным интервалам соответствуют три явно выраженных участка кривой изменения интенсивности отказов, представленной на рисунке 2.1.

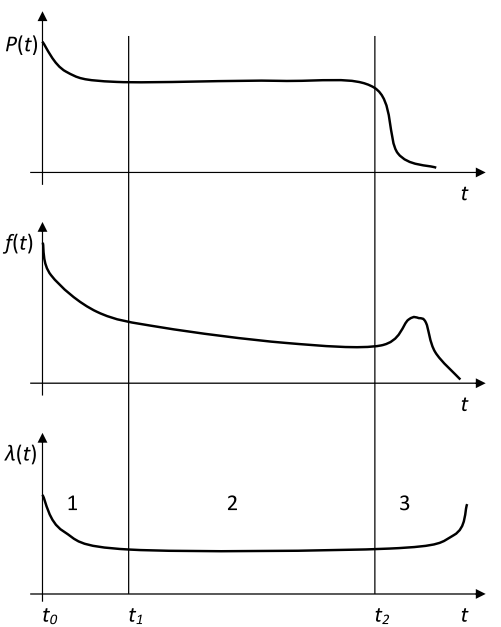


Рис. 2.1 – Типичные формы кривых, характеризующие безотказность элементов: $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $f(t)$ – плотность распределения отказов; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов.

С целью уменьшения количества отказов на участке приработки вводят тщательный контроль качества материалов и комплектующих элементов, а также приработочные испытания. Обычно в расчётах надёжности первый участок кривой не учитывают; расчёты производятся начиная со второго участка. На третьем участке, называемом периодом старения или износа, происходят необратимые физико-химические изменения, когда интенсивность отказов монотонно возрастает и надёжность соответственно снижается.

2.4. Основные показатели надёжности

Надёжность машины является её интегральным свойством, формируемым такими комплексными составляющими, как безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени или наработки. Это свойство особенно важно для объектов, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей, остановкой сложного производства или производства с непрерывным технологическим циклом.

Долговечность – свойство объекта длительно сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, то есть в течение всего периода эксплуатации, при установленной системе технических обслуживаний и ремонтов.

Для невосстанавливаемых объектов понятия безотказности и долговечности практически совпадают.

Ремонтопригодность – свойство объекта, которое заключается в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, а также поддержанию и восстановлению работоспособности с помощью технических обслуживаний и ремонтов. Важность ремонтопригодности машин определяется затратами на их техническую эксплуатацию (ТО и ремонты), сопоставимыми или превышающими первоначальную стоимость машины.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и/или транспортирования. Практическая роль этого свойства особенно важна для приборов и прецизионных деталей, а также многих объектов одноразового использования, для которых характерен значительный промежуток времени между изготовлением и

началом использования, например, стратегические ракеты и другие виды вооружения.

Каждый из перечисленных показателей надёжности имеет свои дифференцированные показатели, имеющие вероятностную природу.

Показатели для оценки безотказности

Основным показателем является *вероятность безотказной работы* $P(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не произойдет. Этот показатель определяется по формуле

$$P(t) = Вер\ (T \geq t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt, \qquad (2.1)$$

где *Вер* – вероятность события; $P(t)$, $F(t)$ – интегральные функции распределения соответственно вероятностей безотказной работы и наступления отказа для наработки t; $0 < P(t) < 1$.

Вероятность противоположного события называется *вероятностью отказа*. Она дополняет вероятность безотказной работы до единицы и определяется по формуле

$$q(t) = Вер\ (T \leq t) = 1 - P(t) = F(t). \qquad (2.2)$$

Например, если вероятность безотказной работы машины в течение $T = 1000$ ч равняется 0,95, то это означает, что из большого количества машин в среднем около 5% машин теряют свою работоспособность раньше, чем через 1000 ч работы.

Показатель $P(t)$ может быть применим и для оценки безотказности одного объекта. В этом случае он определяет способность объекта проработать без отказов заданный период времени. Показатель $P(t)$, как правило, назначается в зависимости от вида выполняемых машиной работ.

Необходимо иметь в виду, что применение $P(t)$ без указания периода времени $t = T$, в течение которого рассматривается работа изделия, некорректно.

На рисунке 2.2 показана зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$ объекта от времени его эксплуатации (наработки).

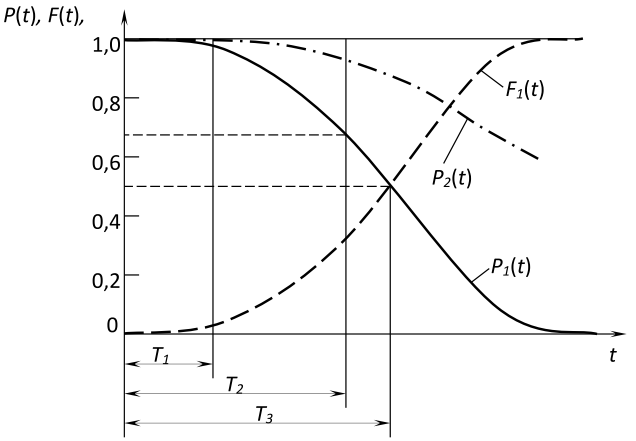


Рис. 2.2 – Зависимость вероятности безотказной работы объекта от наработки

Кривые пересекаются в точке, соответствующей среднему сроку службы объекта $t = T_{ср}$, при котором $P(t) = q(t) = 0{,}5$.

Показатель удобен в том случае, когда $0 < P(t) < 1$, т. е. отказ – редкое событие. В том же случае, когда отказы легко устранимы и не приводят к каким-либо значительным последствиям (предельный износ режущего элемента при работе на станке, отказ системы вентиляции кабины и т. д.) и $P(t) \to 0$, более наглядным показателем безотказности является *параметр потока отказов* $\omega(t)$ – отношение среднего числа отказов объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки. Параметр потока отказов можно вычислить по формуле

$$\omega(t) = \frac{d\Omega(t)}{dt} = \frac{1}{T_{ср}}, \qquad (2.3)$$

где $\Omega(t)$ – среднее число отказов за время t; $T_{ср}$ – наработка на отказ – отношение суммарной наработки изделия к числу отказов, возникших за этот период, т. е. средняя продолжительность безотказной работы объекта.

Таким образом, параметр потока отказов – это среднее количество отказов объекта в единицу времени.

Для невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов понятие наработки различается: в первом случае подразумевается наработка до первого отказа (он же является и последним), во втором – между двумя соседними во времени отказами (после каждого отказа производится восстановление работоспособного состояния).

Математическое ожидание случайной наработки является характеристикой безотказности и называется *средней наработкой на отказ* (*между отказами*) и определяется по формуле

$$\mathrm{M}[T] = \int_0^\infty t f(t) dt = t_0, \tag{2.4}$$

где t – текущее значение наработки; $f(t)$ – плотность вероятности её распределения.

Средняя наработка на отказ – отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Средняя наработка до отказа T_{co} – это математическое ожидание наработки T до отказа невосстанавливаемого объекта. Вычисляется по формуле

$$T_{co} = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_i}{N}, \tag{2.5}$$

где N – количество исследуемых объектов.

Для оценки безотказности невосстанавливаемых объектов используется и такой показатель, как *интенсивность отказов* λ – условная плотность вероятности отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого времени отказ не возник. Показатель определяется по формуле (2.6) и равен отношению среднего числа объектов, отказавших в единицу наработки $N_{отк}$, к числу объектов, оставшихся работоспособными $N_{раб}$:

$$\lambda = \frac{N_{отк}}{N_{раб}}. \tag{2.6}$$

Сравнительно реже в практике используются следующие показатели безотказности:

– гамма-процентная наработка до отказа – наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ, выраженной в процентах;

– осредненный параметр потока отказов – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки.

Показатели для оценки долговечности

Сохранение работоспособности объекта за весь период его эксплуатации до наступления предельного состояния оценивается следующими показателями.

Ресурс – наработка объекта от начала эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до предельного состояния. Наработка есть продолжительность или объём работы объекта, поэтому ресурс исчисляется в единицах времени работы (час), длины пути (километр) или в единицах выпуска продукции (штука – для технологического оборудования). Для невосстанавливаемых объектов понятия ресурса и наработки до отказа совпадают.

Срок службы – календарная наработка объекта до наступления предельного состояния. Обычно выражается в годах.

Отметим, что для большинства машин показатель «срок службы» используется редко, в основном для некоторых видов специальных машин (передвижные радиостанции, пусковые установки и др.). Для массовых машин и их деталей в основном используется показатель «ресурс».

Гамма-процентный ресурс характеризует наработку, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ, выраженной в процентах.

Аналогично определяется *гамма-процентный срок службы.*

Показатели для оценки ремонтопригодности

Время восстановления – продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта.

Среднее время восстановления работоспособности объекта $\overline{T}_в$ – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния, определяемое по формуле

$$\overline{T}_в = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_{вi}}{N}, \qquad (2.7)$$

где $t_{вi}$ – продолжительность восстановления одного объекта; N – количество объектов.

Вероятность восстановления работоспособности в заданные сроки $P_в$ – вероятность того, что время восстановления работоспособности объекта не превысит заданного. Она вычисляется по формуле

$$P_в = P(t_в \le T_з) = \frac{N_в}{N_о}, \qquad (2.8)$$

где $t_в$ – время восстановления; $T_з$ – заданное время восстановления; $N_в$ – количество объектов, восстановленных за время, меньшее заданного; $N_о$ – общее количество объектов.

Для оценки ремонтопригодности машин в качестве показателей также применяются:

– *гамма-процентное время восстановления* – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью γ, выраженной в процентах;

– *интенсивность восстановления* – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определённая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено;

– *средняя трудоемкость восстановления* – математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

Показатели для оценки сохраняемости

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

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

Обобщающие показатели надёжности

Обобщающие показатели применяются для анализа надёжности сложных технических систем. В практике анализа надёжности применяют коэффициент технического использования, коэффициент готовности и коэффициент оперативной готовности.

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ – отношение математического ожидания интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии $\overline{T}_{раб}$ за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, связанных с про-

ведением технических обслуживаний и ремонтов за этот же период эксплуатации $T_{рем.i}$, коэффициент технического использования определяется по формуле

$$K_{ти} = \frac{\overline{T}_{раб}}{\overline{T}_{раб} + \sum_{i=1}^{n} T_{рем.i}}, \qquad (2.9)$$

где n – количество технических обслуживаний и ремонтов.

Коэффициент технического использования является безразмерной величиной ($0 < K_{ти} < 1$). Он численно равен вероятности того, что в данный момент времени объект работает, а не ремонтируется или обслуживается.

Коэффициент технического использования, взятый за период между плановыми ремонтами и техническим обслуживанием, называется коэффициентом готовности.

Коэффициент готовности $K_г$ учитывает непредусмотренные остановки объекта, наличие которых свидетельствует о том, что плановые ремонты и мероприятия по техническому обслуживанию не полностью выполняют свою роль. Он численно равен вероятности того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых эксплуатация объекта не предусматривается. Коэффициент готовности вычисляется по формуле

$$K_г = \frac{\overline{T}_р}{\overline{T}_р + \overline{T}_{вр}}, \qquad (2.10)$$

где $\overline{T}_р$ – среднее время нахождения в работоспособном состоянии; $\overline{T}_{вр}$ – среднее время нахождения во внеплановом ремонте.

Коэффициент готовности количественно характеризует одновременно два показателя – безотказность и ремонтопригодность.

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

3. Математические основы надёжности

Любая машина – самолёт, автомобиль, локомотив и т. п. – с точки зрения присущих ей показателей надёжности имеет выраженный индивидуальный характер. При этом наиболее явно индивидуальные свойства проявляются в области показателей безотказности и долговечности. Основными причинами, вызывающими рассеивание показателей надёжности, являются:

– колебания свойств материалов;

– колебания размеров, формы и свойств одноименных деталей;

– колебания характеристик сопряжений, собранных из «одинаковых» деталей, и взаимосвязей конструктивных элементов, узлов и агрегатов машины;

– погрешности, вызванные отклонениями от назначенных режимов испытаний и обработки их результатов;

– различия в дорожно-климатических условиях и интенсивности эксплуатации машин;

– эргатические факторы;

– вариативный характер деградационных процессов;

– изменения характеристик, обусловленные ремонтами.

Первые четыре фактора накапливаются в сфере производства машин, другие четыре – в сфере эксплуатации и ремонта.

Для получения информации о показателях надёжности деталей, узлов, агрегатов, систем и машин в основном используются следующие источники: аналитические расчёты на безотказность и долговечность, результаты стендовых и полигонных испытаний, сведения о результатах эксплуатации, содержание ремонтных работ и др.

Полученная в результате использования одного или нескольких названных источников информации подвергается сортировке по однородности и совместимости исходных условий, затем анализируется, при этом отбрасываются нехарактерные данные (выбросы процесса).

Подготовленная к использованию информация служит для определения теоретического закона распределения исследуемой случайной величины. Установление закона распределения случайной величины, соответствующего данным наблюдений, производится методами математической статистики.

Оценки численных значений показателей надёжности машин, их деталей и узлов основываются, как правило, на статистической обработке экспериментальных данных, полученных для одной из следу-

ющих групп изделий: генеральной совокупности изделий; выборки из нее, все детали которой доведены до предельного состояния (полной выборки); усеченной выборки, в которой часть изделий не достигла предельного состояния; смешанных выборках для изделий, выполняющих одинаковые функции.

Понятие «генеральная совокупность» подразумевает весь комплекс изделий одной модели и одного времени выпуска, эксплуатируемых в одинаковых условиях.

3.1. Графическое представление эмпирического распределения

Основу статистического исследования составляет множество данных, полученных в результате измерений одного или нескольких признаков L: L_1, L_2, … L_n, называемых конкретными реализациями случайной величины L. Наиболее наглядным является их графическое представление, выполняемое в следующей последовательности.

3.1.1. Формирование ранжированного (как правило, в порядке возрастания) ряда из n исходных данных: L_1, L_2, … L_n.

3.1.2. Выявление наименьшего и наибольшего значений выборки:

$$L_{\max},\ L_{\min}$$

3.1.3. Определение размаха варьирования выборки R по формуле

$$R = L_{\max} - L_{\min}. \qquad (3.1)$$

При объёме выборки $n > 50$ обработку эмпирических данных рекомендуется вести по значениям, сгруппированным в K непересекающихся интервалов.

3.1.4. Определение количества интервалов группирования K по формуле

$$K = 1 + 3{,}3\lg n. \qquad (3.2)$$

Полученное значение округляется до целого числа в меньшую сторону.

3.1.5. Определение величины интервала группирования ΔL происходит по формуле

$$\Delta L = R/K. \qquad (3.3)$$

3.1.6. Подсчёт частот (частостей) попадания случайных величин в интервалы группирования.

Вычисляются границы каждого из K интервалов. Подсчитывается количество n_j данных, находящихся в каждом из интервалов, и вычисляются частости p_j попадания в каждый интервал по формуле

$$p_j = n_j/n, \quad j = 1, 2, \ldots, K. \tag{3.4}$$

Необходимо, чтобы в каждый инервал попадало не менее пяти данных, в противном случае рассматриваемый интервал объединяется с соседним интервалом таким образом, чтобы ожидаемое число наблюдений в объединенном интервале было не менее пяти.

Построение гистограммы

Для графического изображения эмпирического распределения по верхним граничным точкам или серединам интервалов строится график – гистограмма, вид которой представлен на рисунке 3.1.

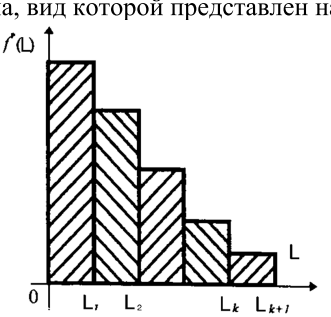


Рис. 3.1 – Гистограмма

Для построения гистограммы по оси абсцисс откладывают в выбранном масштабе интервалы и, взяв их как основания, строят прямоугольники, площадь которых равна частости попадания случайной величины в интервал. Частость каждого интервала делится на его ширину. Полученное число берется как высота прямоугольника. Построенная таким образом ступенчатая функция $f_э(L)$ называется гистограммой выборки. Эта функция служит статистическим аналогом плотности распределения вероятности случайной величины и определяется по формуле

$$f_э(L) = n_j. \tag{3.5}$$

Площадь гистограммы равна единице.

3.2. Статистические меры случайной величины

Статическими мерами (статическими моментами) случайной величины называются наиболее существенные числовые характеристики распределения – центра распределения, рассеивания случайной величины относительно центра, масштаба и формы кривой распределения, которые служат для описания и сравнения распределений.

Наиболее часто используемыми в теории надёжности центральными числовыми характеристиками случайной величины (статистическими моментами первого порядка) являются характеристики положения:

– среднее арифметическое (математическое ожидание);

– медиана или срединное значение;

– мода;

– среднее геометрическое.

Математическим ожиданием $\overline{L}$ случайной величины называется постоянное число, около которого устойчиво колеблется среднее арифметическое значение случайной величины. При большой выборке среднее арифметическое значений случайной величины сходится по вероятности к её математическому ожиданию, которое может быть вычислено по следующей формуле:

$$\overline{L} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L_i \,. \tag{3.6}$$

Важной числовой характеристикой распределения при малых выборках (от пяти до девяти значений) является ***медиана***, или ***срединное значение***. Если n – нечётное число, то медиана просто является числом, расположенным в середине упорядоченной последовательности. Если n – чётное число, то медиана – это среднее арифметическое двух рядом стоящих срединных значений.

Модой M случайной величины является такое её значение, которому соответствует наибольшее значение плотности распределения $M = p_{\max}$. Как и медиана, мода не подвержена воздействию крайних членов ряда измерений; она зависит лишь от соотношения величин в «точке накопления». Мода M удобна для исследования многовершинных распределений.

Среднее геометрическое ряда измерений вычисляется по формуле

$$\dot{L} = \sqrt[n]{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot \ldots \cdot L_n} \,. \tag{3.7}$$

На практике среднее геометрическое используется для исследования динамики фактора, например, среднего темпа возрастания (снижения) производственного брака.

Основные числовые характеристики положения показаны на рисунке 3.2.

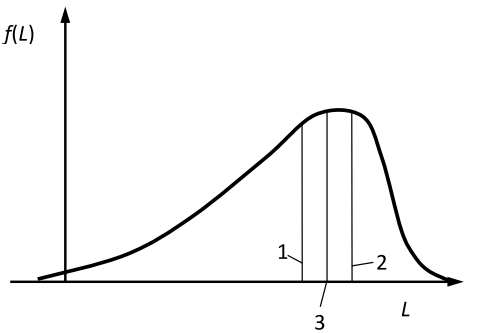


Рис. 3.2 – Плотность вероятности и центральные числовые характеристики случайной величины: *1* – медиана; *2* – мода; *3* – математическое ожидание.

Характеристики рассеивания (статистические моменты второго порядка) – дисперсия, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации случайной величины – показывают, насколько тесно сгруппированы возможные значения случайной величины около её математического ожидания, т. е. характеризуют степень разброса или рассеивания.

Дисперсией *D* случайной величины называется математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от её математического ожидания, которая вычисляется по формуле

$$D = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(L_i - \overline{L})^2 . \qquad (3.8)$$

Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины, что не всегда удобно. Поэтому на практике чаще используется характеристика, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины, – ***среднее квадратическое отклонение S***, которое равно

квадратному корню из дисперсии, взятому с положительным знаком, и рассчитывается по формуле

$$S=\sqrt{D}. \tag{3.9}$$

Коэффициент вариации υ оценивает рассеивание в относительных единицах, или в процентах, для чего значения, вычисленные по формуле (3.10), умножают на 100%.

$$\upsilon=\frac{S}{\overline{L}} \text{ или } \upsilon=\frac{S}{\overline{L}}\cdot 100\%. \tag{3.10}$$

Для анализа асимметричности и плосковершинности кривой распределения необходимо знать величины асимметрии и эксцесса (статистические моменты третьего и четвёртого порядка).

Асимметрия ρ_b вычисляется по формуле

$$\rho_b=\frac{\sum_{j=1}^{K} n_j(L_j-\overline{L})^3}{nS^3}. \tag{3.11}$$

Если кривая распределения симметрична, то асимметрия равна нулю, если вытянутая часть кривой расположена слева от моды, то асимметрия отрицательна, а если справа – положительна. На рисунке 3.3 показаны два асимметричных распределения, из которых *1* имеет положительную, а *2* – отрицательную асимметрию.

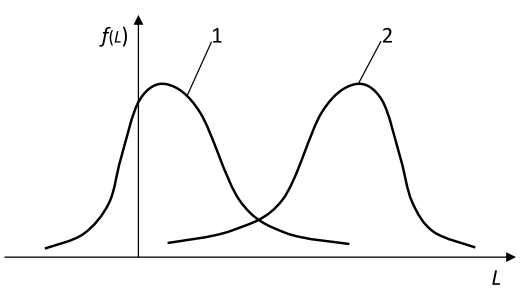


Рис. 3.3 – Влияние асимметрии на положение кривой распределения

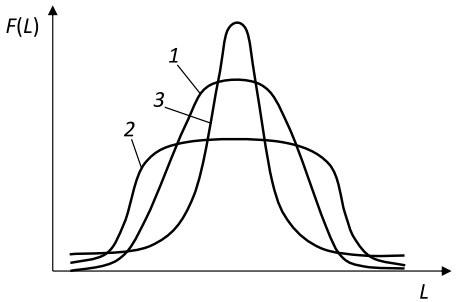


Рис. 3.4 – Влияние эксцесса на форму кривой распределения

Эксцесс E_k характеризует плосковершинность кривой распределения и рассчитывается по формуле

$$E_k = \frac{\sum_{j=1}^{K} n_j (L_j - \overline{L})^4}{nS^4} - 3. \qquad (3.12)$$

Влияние эксцесса на форму кривой распределения показано на рисунке 3.4. Для нормального распределения (кривая *1*) эксцесс равен нулю. Если эксцесс отрицательный (кривая *2*), распределение $f(L)$ по сравнению с нормальным имеет более низкую и «плоскую» вершину, а если эксцесс положительный (кривая *3*), то более высокую и «острую».

3.3. Законы распределения случайных величин

Статистические характеристики, полученные по опытным данным, не позволяют в полной мере анализировать характер изменения случайной величины. Необходимо знать закон её распределения, выраженный в математической форме – интегральную функцию распределения или функцию плотности распределения вероятностей.

Плотность распределения $f(L)$ подчиняется соотношению

$$f(L) = \lim_{L \to 0} \frac{F(L+\Delta L) - F(L)}{\Delta L}, \qquad (3.13)$$

где $F(L)$ – функция распределения, которая определяется по формуле

$$F(L) = \int_{-\infty}^{L} f(L)dL. \qquad (3.14)$$

Законом распределения случайной величины называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Законы распределения имеют большое значение для теории и практики с точки зрения оценки и обеспечения показателей надёжности объекта. Они позволяют:

– осуществлять контроль уровня показателя надёжности в эксплуатационных условиях;

– оценивать возможности дальнейшего расходования ресурса;

– определять необходимость выполнения работ по совершенствованию изделий и по повышению уровней их показателей надёжности.

Наибольшее распространение для исследования эксплуатационной надёжности имеют следующие непрерывные законы распределения: нормальный, экспоненциальный, Вейбулла, логарифмически нормальный законы и др.

Решение задачи о наилучшем подборе теоретического распределения в общем случае является неопределённым, поэтому для принятия модели описания случайной величины в первом приближении обычно учитывают внешний вид эмпирического распределения или анализируют характеристики. Например, при коэффициенте вариации $\upsilon = 1$ принимается экспоненциальное распределение, а при $\upsilon \le 0{,}3 \ldots 0{,}4$ – нормальное.

Рассмотрим наиболее распространенные непрерывные распределения.

Экспоненциальное (*показательное*) *распределение*

Экспоненциальное распределение используется при рассмотрении:

– внезапных отказов в тех случаях, когда явления изнашивания и старения настолько слабо выражены, что ими можно пренебречь, например в радиоэлектронной аппаратуре;

– наработок между отказами восстанавливаемых изделий после окончания периода приработки;

– в первом приближении – времени восстановления ремонтируемых изделий.

Распределение используется в проектных расчётах показателей надёжности на стадии разработки сложных систем, и его часто называют *основным законом надёжности*. Особенность этого закона – простота в практическом применении и отсутствие больших вычислительных процедур при расчёте показателя надёжности.

Плотность экспоненциального распределения рассчитывается по формуле

$$f(L) = \lambda \exp(-\lambda L), \tag{3.15}$$

где λ – параметр распределения, имеющий вероятностный смысл.

Интегральная функция этого распределения находится по уравнению

$$F(L) = 1 - \exp(-\lambda L). \tag{3.16}$$

Математическое ожидание и дисперсия связаны с параметром распределения соотношениями:

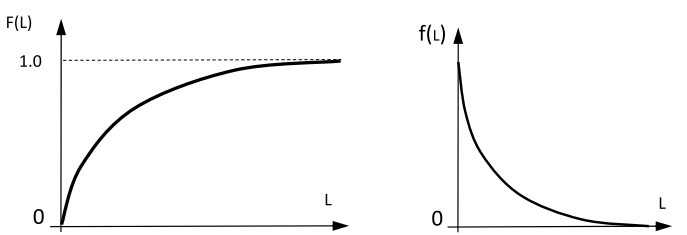
$$\overline{L} = 1/\lambda; \tag{3.17}$$

$$D = 1/\lambda^2. \tag{3.18}$$

Коэффициент вариации для экспоненциального распределения определяется по формуле

$$\upsilon = S/\overline{L} = 1. \tag{3.19}$$

Распределение является *однопараметрическим,* так как характер изменения кривой зависит от одного параметра λ. Кривые функции и плотности распределения показаны на рисунке 3.5.



а *б*

Рис. 3.5 – Кривые функции (*а*) и плотности (*б*) экспоненциального распределения

Нормальное распределение (*закон Гаусса*)

Нормальное распределение наиболее часто используется в задачах надёжности для описания:

– постепенных отказов;

– суммарной наработки ряда восстанавливаемых изделий до капитального ремонта;

– наработки до отказа невосстанавливаемых изделий;

– времени восстановления ремонтируемых изделий.

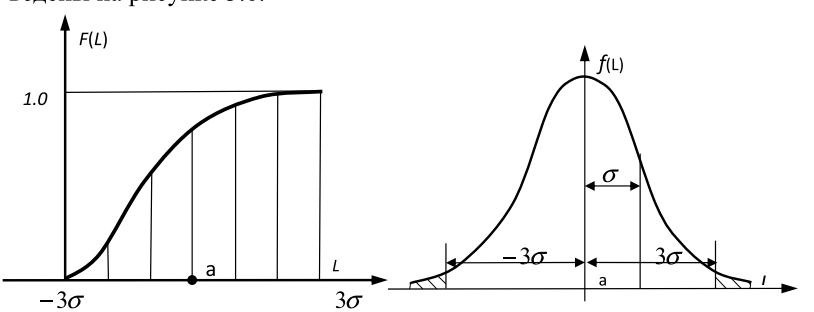
Плотность нормального распределения определяется выражением

$$f(L)=\frac{1}{S\sqrt{2\pi}}\exp[-\frac{(L_i-\overline{L})^2}{2S^2}]. \qquad (3.20)$$

Интегральная функция нормального распределения рассчитывается по формуле

$$F(L)=\frac{1}{S\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{L}\exp[-\frac{(L_i-\overline{L})^2}{2S^2}]dL. \qquad (3.21)$$

Кривые функции и плотности нормального распределения приведены на рисунке 3.6.



а *б*

Рис. 3.6 – Кривые функции (*а*) и плотности (*б*) нормального распределения

Совокупность всех значений случайной величины, подчиненной нормальному закону, с вероятностью 99,73% попадает в область,

ограниченную интервалом –3σ слева и 3σ справа от среднего значения (правило «трех сигм», при этом $S = \sigma_x$) (рис. 3.7).

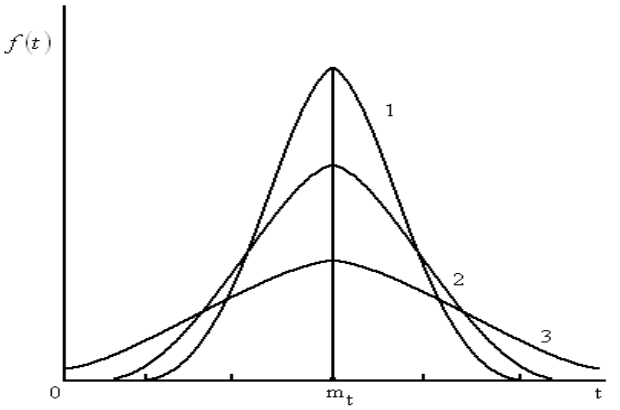


Рис. 3.7 – Плотность распределения нормального закона:
1 – $S_t = 0{,}5$; *2* – $S_t = 1$; *3* – $S_t = 2$.

Вероятность отказа и вероятность безотказной работы рассчитываются по формулам

$$F(t) = 0{,}5 + F\left(\frac{t - m_t}{S_t}\right); \quad P(t) = 0{,}5 - F\left(\frac{t - m_t}{S_t}\right), \qquad (3.22)$$

где $F\left(\frac{t - m_t}{S_t}\right)$ – функция Лапласа, задаваемая таблично.

При использовании справочных таблиц применяют подстановку $z = \frac{t - m_t}{S_T}$, которую обозначают u_p и называют квантилью нормированного нормального распределения.

Логарифмически нормальное распределение

Это распределение чаще всего может быть использовано при анализе постепенных отказов в результате нарушения прочности и снижения усталостной долговечности под влиянием переменных нагрузок и вибрации. Например, отказы элементов несущих систем,

элементов кривошипно-шатунной группы ДВС, систем автоматики и электронных систем управления.

Плотность логарифмически нормального закона распределения записывается в виде

$$f(t)=\frac{1}{S_{\ln t}\cdot t\cdot\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t-\ln t_0}{S_{\ln t}}\right)^2\right]. \qquad (3.23)$$

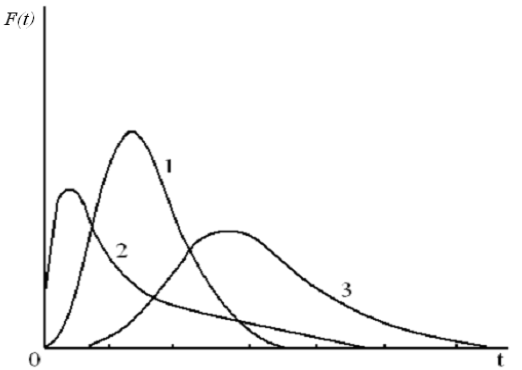


Рис. 3.8 – Плотности логарифмически нормального закона распределения:
1 – $S_{\ln t}$ = 0,5, $\ln t_0$ = 0; *2* – $S_{\ln t}$ = 1, $\ln t$ = 0; *3* – $S_{\ln t}$ = 0,5, $\ln t_0$ = 1.

Математическое ожидание $\ln t_0$ и среднеквадратическое отклонение $S_{\ln t}$ натурального логарифма случайной величины t, обозначающей наработку, определяются на основе соотношений:

$$\ln t_0 \approx \overline{\ln t}_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\ln t_i\,;$$

$$S_{\ln t} \approx \overline{S}\ln t = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\ln t_i - \ln t_0\right)^2}\,. \qquad (3.24)$$

Функция распределения вероятностей логарифмически нормального закона записывается по формуле

$$F(t)=\int_0^t \frac{1}{S_{\ln t}\cdot t\cdot\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t-\ln t_0}{S_{\ln t}}\right)^2\right]dt, \tag{3.25}$$

и её можно связать с аналогичной нормированной случайной величиной z, распределённой по нормальному закону, формула

$$F(t)=P\{t\le t_3\}=P\left(z\le\frac{ln\ t-ln\ t_0}{S_{ln\ t}}\right). \tag{3.26}$$

Вероятность безотказной работы записывается следующим образом:

$$P(t)=P\{t\le t_3\}=P\left(z>\frac{\ln t-\ln t_0}{S_{\ln t}}\right), \tag{3.27}$$

а интенсивность отказов имеет вид

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{P(t)}=\frac{\varphi\left(\frac{\ln t-\ln t_0}{S_{\ln t}}\right)}{t\cdot S_{\ln t}\cdot P(t)}, \tag{3.28}$$

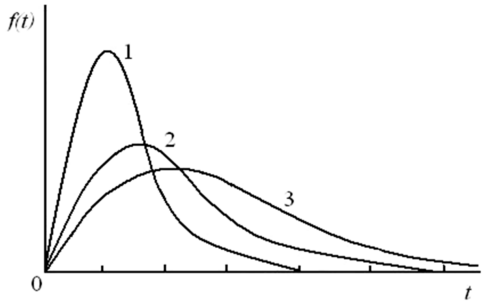
где φ – плотность нормированного нормального распределения, определяемая по справочным таблицам.

Распределение Рэлея

Используется в основном для анализа работы элементов, имеющих ярко выраженный эффект старения (элементы электрооборудования, различного рода уплотнения, шайбы, прокладки, изготовленные из резиновых или синтетических материалов). Функция плотности распределения вероятности отказов в этом случае определяется выражением

$$f(t)=\frac{2t}{S^2}\exp\left[-\left(\frac{t}{S}\right)^2\right], \tag{3.29}$$

где S – параметр распределения.



Ри. 3.9 – Плотность закона распределения Рэлея с параметрами:
1 – $S = 0{,}32$; *2* – $S = 0{,}6$; *3* – $S = 1$.

Количественные характеристики безотказности в случае закона распределения Рэлея имеют следующий вид.

Интенсивность отказов рассчитывается по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{2t}{S^2}. \tag{3.30}$$

Вероятность безотказной работы определяется по формуле

$$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{S}\right)^2\right]. \tag{3.31}$$

Наработка до первого отказа рассчитывается по формуле

$$t_{cp} = \int_0^x P(t)dt = \int_0^\infty \exp\left[-\left(\frac{t}{S}\right)^2\right]dt = \frac{\sqrt{\pi}\cdot S}{2}. \tag{3.32}$$

Выражение для $\lambda(t)$ показывает, что интенсивность отказов возрастает прямо пропорционально увеличению наработки.

Распределение Вейбулла – Гнеденко

Этим распределением хорошо описываются распределения наработок до непланового ремонта оборудования мобильных машин, время простоя в ремонтах, величины коэффициента технического использования, потоки отказов систем питания, смазки, охлаждения и др.

Двухпараметрическая плотность вероятности распределения определяется по формуле

$$f(t)=\frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right], \tag{3.33}$$

где b – параметр формы; a – параметр масштаба распределения (рис. 3.10).

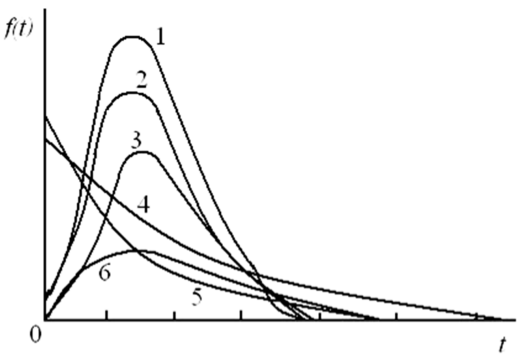


Рис. 3.10 – Плотность закона распределения Вейбулла – Гнеденко:
1 – $b = 4$, $a = 1$; *2* – $b = 3$, $a = 1$; *3* – $b = 2$, $a = 1$;
4 – $b = 1$, $a = 1$; *5* – $b = 0{,}5$, $a = 1$; *6* – $b = 1{,}5$, $a = 2$.

При наработке t_0, в течение которой отказы не происходят, т. е. при произвольном начале отсчёта:

$$f(t)=\frac{b}{a}\cdot\left(\frac{t-t_0}{a}\right)\cdot exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{a}\right)^{b}\right],\ t\geq t_0. \tag{3.34}$$

Функция распределения вероятностей отражена в формуле

$$F(t)=1-exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right]. \tag{3.35}$$

Вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле

$$P(t)=1-F(t)=exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right]. \qquad (3.36)$$

Интенсивность отказов рассчитывается по формуле

$$\lambda(t)=\frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}. \qquad (3.37)$$

Наработка до первого отказа приведена в формуле

$$t_{cp}=a\Gamma\left(1+\frac{1}{b}\right), \qquad (3.38)$$

где Γ – табулированная гамма-функция.

Гамма-распределение

Как и распределение Вейбулла – Гнеденко, гамма-распределение входит в класс экспоненциальных распределений. Поэтому его можно применять для описания распределения наработки до *n-го* отказа восстанавливаемого изделия, время безотказной работы которого подчиняется экспоненциальному распределению.

Плотность вероятности гамма-распределения рассчитывается по формуле

$$f(t)=\frac{t^{b-1}}{a^{b}\cdot\Gamma(b)}\exp\left(-\frac{t}{a}\right);\quad t\geq 0;\ b>0;\ a>0, \qquad (3.39)$$

где b – параметр формы; a – параметр масштаба; $\Gamma(b)=\int_0^x t^{b-1}\cdot e^{-t}dt$ – табулированная полная гамма-функция.

Функцию распределения выражают через отношение неполной гамма-функции $\Gamma(b,x)=\int_0^x y^{b-1}\exp(-y)dy$ к полной: $F(t) = \Gamma(b, t/a)/\Gamma(b)$. Данная функция приведена на рисунке 3.11.

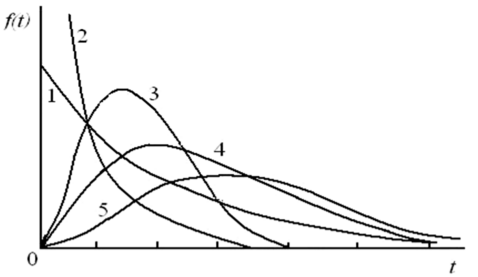


Рис. 3.11 – Плотности гамма-распределения с параметрами:
1 – $b = 0$, $a = 1$; *2* – $b = -0{,}5$, $a = 1$; *3* – $b = 1$, $a = 0{,}5$;
4 – $b = 1$, $a = 1$; *5* – $b = 2$, $a = 1$.

Если b – целое положительное число, то вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{a}\right) \cdot \sum_{t=0}^{b-1} \frac{(t/a)^i}{i!}, \qquad (3.40)$$

а функция интенсивности отказов рассчитывается по формуле

$$\lambda(t) = \frac{t^{b-1}}{a^b \cdot (b-1)!} \sum_{t=0}^{b-1} \frac{(t/a)^i}{i!}. \qquad (3.41)$$

Наработка до первого отказа определяется по формуле

$$t_{\text{ср}} = b \cdot a. \qquad (3.42)$$

Функция интенсивности отказов уменьшается при $b < 1$ и возрастает при $b > 1$. Если $b = 1$, то гамма-распределение превращается в экспоненциальное и интенсивность отказов $\lambda(t) = a = \text{const}$.

При больших значениях b гамма-распределение сводится к нормальному распределению. Типичные примеры функций плотности гамма-распределения очень похожи на функции плотности распределения Вейбулла – Гнеденко.

Трехпараметрическое распределение Вейбулла

Закон Вейбулла хорошо описывает распределения:

– предела текучести ряда металлов;

– характеристик прочности металлов;

– наработок до отказа многих невосстанавливаемых изделий, например подшипников качения;

– наработок между отказами сложных систем в процессе эксплуатации.

Плотность распределения Вейбулла имеет вид

$$f(L,a,b,c)=\begin{cases}\dfrac{b}{c}\left[\dfrac{L-c}{a}\right]^{b-1}\exp\left[-\left[\dfrac{l-c}{a}\right]^{b}\right] & \text{при } L\ge c,\\ 0 \text{ при } L<0,\end{cases} \tag{3.43}$$

где a – параметр масштаба; b – параметр формы; c – параметр сдвига.

Интегральная функция распределения записывается в виде

$$F(L)=1-exp\left[-\left(\frac{L-c}{a}\right)^{b}\right]. \tag{3.44}$$

Закон распределения Вейбулла является универсальным, так как при определенных значениях параметров он может превращаться в экспоненциальное (при b = 1), нормальное (при $b \approx 3{,}3$) и другие распределения. Кривые плотностей и функции распределения приведены на рисунке 3.12.

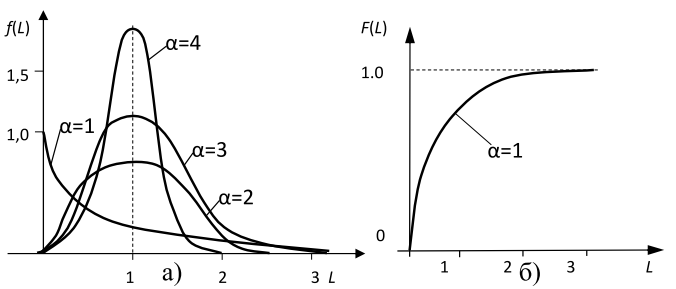


Рис. 3.12 – Кривые плотностей (*а*) и функции (*б*) распределения Вейбулла

Определение оценок параметров распределения Вейбулла по совокупности статистических данных осуществляется в следующей последовательности.

По полученному значению асимметрии ρ_b из специально составленной таблицы находят оценку параметра формы $\overline{b}$ и значения коэффициентов g_b и k_b.

Определяют оценку параметра масштаба $\overline{a}$ по формуле

$$\overline{a}=\overline{S}/g_b. \tag{3.45}$$

Находят значение $\overline{c}$ по формуле

$$\overline{c} = \overline{L} - \overline{a}k_b . \tag{3.46}$$

В качестве оценки параметра c принимают одно из двух значений:

$$c = \begin{cases} \overline{c}, \text{ если } \overline{c} \le L_{\min} \\ L_{\min}, \text{ если } \overline{c} > L_{\min} \end{cases}, \tag{3.47}$$

где L_{min} – наименьшее значение выборки эмпирических данных.

Законы распределений случайных величин взаимосвязаны, и их взаимосвязь показана на рисунке 3.13.

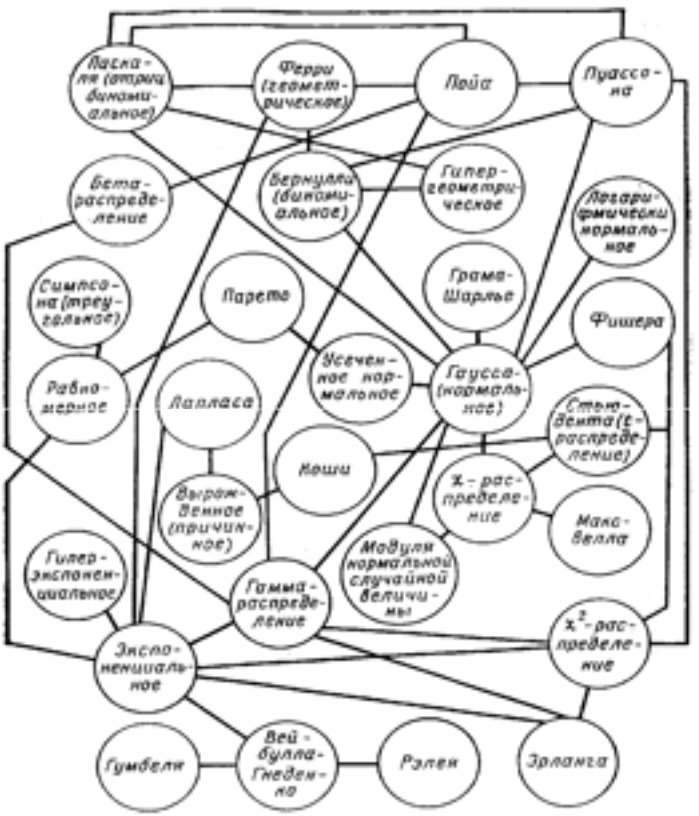


Рис. 3.13 – Граф связей между законами распределений случайных величин

3.4. Порядок статистической обработки данных

На рисунке 3.14 приведена блок-схема статистической обработки данных для трёх типов выборок – полной, усеченной и многократно усечённой.



Рис. 3.14 – Блок-схема обработки статистических данных

Накопленный опыт статистической обработки данных о показателях надёжности типовых деталей и узлов, а также результаты режимометрических и тензометрических испытаний показывают, что для определения закона распределения следует использовать:

– метод наибольшего (максимума) правдоподобия (ММП);
– метод моментов;
– метод квантилей.

Метод максимума правдоподобия

Пусть случайная величина X распределена по закону, плотность вероятностей которого $f(x, a)$, где a – некоторый параметр закона. То-

гда в качестве функции правдоподобия E используется некоторая функция, зависящая от n выборочных значений X и оценки параметра a, и рассчитывается она по формуле

$$E(x_1, x_2, ..., x_n, a) = \prod_{i=1}^{n} f(x_i, a). \qquad (3.48)$$

Функция E достигает своего максимума при некотором значении $\bar{a}$, которое и будет состоятельной, достаточной, асимптотически несмещённой, эффективной оценкой параметра. Вместо максимума E удобнее искать максимум $\ln E$, так как в этом случае экстремум достигается при одном и том же $\bar{a}$, которое находится в решении относительно $\bar{a}$ уравнения

$$\frac{d \ln E}{da} = 0.$$

Например, пусть $f(x, \lambda) = \lambda^{-\lambda x}$ – экспоненциальный закон распределения, тогда

$$E = \prod_{i=1}^{n} \lambda_e^{-\lambda x_i} = \lambda^n \exp\left(-\lambda \sum_{i=1}^{n} x_i \right);$$

$$\ln E = n \ln \lambda - \lambda \sum_{i=1}^{n} x_i;$$

$$\frac{d \ln E}{d \lambda} = \frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^{n} x_i = 0,$$

откуда

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i} = \frac{1}{\bar{x}_{cp}},$$

т. е. оценкой будет величина, обратная среднему значению x.

Считается, что метод максимума правдоподобия является наиболее сильным методом получения несмещённых, состоятельных и эффективных оценок параметров распределений. Метод максимума правдоподобия позволяет получить оценки параметров распределений для усеченных и незавершенных выборок.

К недостаткам этого метода можно отнести сложность получаемых расчётных зависимостей для некоторых законов распределения.

Метод моментов

Сущность метода моментов состоит в том, что, например, центральные моменты распределения, зависящие от неизвестных параметров, приравниваются к эмпирическим статистическим моментам. Число уравнений, а следовательно, и количество моментов зависит от числа неизвестных параметров. Пусть известно, что для нормального закона первый теоретический центральный момент μ_1 (математическое ожидание) есть параметр a, а второй теоретический момент μ_2 (дисперсия) – параметр σ^2. Из замены теоретических моментов эмпирическими $\mu_1 = x_{cp} = a$ и $\mu_2 = S^2 = \sigma^2$ получается

$$\overline{a} = x_{cp},\ \sigma^2 = S^2.$$

Для некоторых законов распределения (нормального, экспоненциального, Рэлея) оценки параметров, найденных методом наибольшего правдоподобия и методом моментов, совпадают.

Основными недостатками метода моментов являются, во-первых, невозможность применения для обработки усеченных и многократно усеченных выборок, так как эмпирические моменты определяются только по полным выборкам; во-вторых, для некоторых законов распределения оценки параметров не являются наилучшими с точки зрения их эффективности.

Метод квантилей

Квантилем, отвечающим заданному уровню вероятности p, называют такое значение случайной величины $x = x_p$, при котором функция распределения принимает значение, равное p, т. е. $F(x_p) = p$. При этом методе квантили теоретического распределения приравниваются к эмпирическим. Число соответствующих уравнений берется равным числу оцениваемых параметров.

Проиллюстрируем метод на примере функции распределения Вейбулла. Выбрав две наработки L_1 и L_2 ($L_1 < L_2$), соответствующие накопленным частотам r_1 и r_2, записываем искомые уравнения в виде:

$$1 - \exp\left[-\left(L_1 / L_0\right)^m\right] = r_1 / N;$$

$$1 - \exp\left[-(L_2 / L_0)^m\right] = r_2 / N.$$

Решая систему уравнений, находим:

$$m = \frac{\ln\ln(1 - r_1 / N)^{-1} - \ln\ln(1 - r_2 / N)^{-1}}{\ln L_1 - \ln L_2};$$

$$\ln L_0 = \frac{1}{m}\ln\ln(1 - r_1 / N) - \ln L_1.$$

Метод квантилей может быть использован при нахождении параметров усеченной выборки, при этом $r_1 < r_2 < r$, где r – количество отказавших изделий.

Для приближенного нахождения параметров законов распределения используются графические способы, в частности, вероятностные бумаги. С помощью вероятностных бумаг могут быть обработаны полные, усеченные и приведенные к усеченным незавершенные выборки. Для этого пары значений $F(x_i)$; x_i наносятся на выбранный тип бумаги. Через точки проводится прямая линия «на глаз» или используется метод наименьших квадратов. Параметры прямой сопоставляются с параметрами искомого закона распределения. Точность данного метода нахождения параметров невысокая, однако он удобен для быстрого нахождения предварительных оценок.

Рекомендации по выбору закона распределения

Опыт эксплуатации машин различного назначения рекомендует области использования некоторых законов распределения (табл. 3.1) для моделирования различных отказов.

Таблица 3.1 – Рекомендуемые законы распределения

Объект контроля	**Наиболее характерные вид и/или причина отказа**	**Закон распределения наработок**	**Значение коэффициента вариации**
Машина, агрегат	Смешанный	Экспоненциальный	1,0
Деталь	Износ	Нормальный	До 0,35
	Старение	Нормальный	До 0,35
	Усталостное разрушение	Логарифмически нормальный	0,4–0,7
	Контактная усталость (подшипники)	Закон Вейбулла	0,4–0,7
	Разрушение от перегрузки	Экспоненциальный	1,0
	Задиры	Экспоненциальный	1,0

Продолжение табл. 3.1

Объект контроля	Наиболее характерные вид и/или причина отказа	Закон распределения наработок	Значение коэффициента вариации
Деталь	Прогары	Закон Вейбулла	1,0
	Коррозия	Нормальный	0,3–0,4
	Смешанный	Экспоненциальный	1,0

Пример. Требуется оценить вероятность безотказной работы и интенсивность отказов подшипников скольжения двигателя после наработки 150 тыс. км. Ресурс по критерию изнашивания подшипников описывается нормальным законом с параметрами: $m_t = 450 \cdot 10^3$ км; $S_t = 120 \cdot 10^3$ км.

Вероятность безотказной работы связана с нормированной случайной величиной z, распределенной по нормальному закону, соотношением

$$P(t) = P\{t > t\} = P\left(z > \frac{t - m_t}{S_t}\right).$$

В данном случае

$$P(150 \cdot 10^3) = P\left(z > \frac{150 - 450}{120}\right) = P(z > -2{,}5) = \Phi(2{,}5).$$

Значение Ф(2,5) находится с помощью таблиц. $P(150 \cdot 10^3) = 0{,}9938$. Аналогичный результат можно получить, используя в качестве функции распределения случайной величины z выражение (3.22):

$$P(t) = 0{,}5 - F\left(\frac{t - m_t}{S_t}\right),$$

а величина $F(z) = F\left(\frac{t - m_t}{S_t}\right)$ находится по справочным таблицам.

$$P(150 \cdot 10^3) = 0{,}5 - F\left(\frac{150 - 450}{120}\right) = 0{,}5 - F(-2{,}5) = 0{,}5 + 0{,}4938 = 0{,}9938.$$

Значение интенсивности отказов может быть найдено с помощью соотношения

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{R(t)}=\frac{\varphi\left(z=\dfrac{t-m_t}{S_t}\right)}{S_t\cdot R(t)},$$

где $\varphi(z)$ определяется с помощью таблиц. В данном случае

$$\lambda(150\cdot10^3)=\frac{\varphi(-2{,}5)}{S_t\cdot R(150\cdot10^3)}=\frac{0{,}01753}{120\cdot10^3\cdot0{,}9938}=14{,}69\cdot10^{-8}\ (1/\text{км}).$$

3.5. Суперпозиция и композиция законов распределения

Многие системы, агрегаты, узлы и детали машин одновременно работают под воздействием нескольких повреждающих процессов. В таких условиях суммарное распределение показателей надёжности объектов представляет собой суперпозицию или композицию нескольких распределений.

Суперпозиция законов распределения

Для описания эмпирических распределений, особенно при наличии нескольких максимумов, используют суперпозицию (смесь или линейную комбинацию) плотностей распределения $g(x)$, определяемую по формуле

$$g(x)=\sum_{k=1}^{n}c_k\cdot f_k(x), \qquad (3.49)$$

где $f_k(x)$ – плотность k-го распределения; c_k – коэффициенты суперпозиции, подчиняющиеся условию $\sum_{k=1}^{n}c_k=1$.

При обработке данных эксплуатационных наблюдений к появлению суперпозиции могут привести следующие причины: в подконтрольной партии находятся технические системы, некоторые детали которых изготовлены на разных заводах, по старой и новой технологии, до и после конструктивных изменений; технические системы подконтрольной партии эксплуатируются в различных условиях.

Для расчёта среднего значения и дисперсии суперпозиции используются формулы:

$$\overline{x}_g = \sum_{k=1}^{n} c_k \cdot \overline{x}_k \ ;$$

$$D_g = \sigma_g^2 = \sum_{k=1}^{n} c_k \cdot \left[D_k + \left(\overline{x}_k - \overline{x}_g \right)^2 \right],$$

где $\overline{x}_k$, D_k – среднее значение и дисперсия k-го распределения.

Композиция законов распределения

Сумма $x+y$, подчиняющихся законам распределения $f(x)$ и $f(y)$, является случайной величиной z, подчиняющейся закону распределения $f(z)$. Такая операция является композицией законов распределения.

Расчётные формулы для композиции записываются в виде формул (3.50):

$$f(z) = \int_a^b f_1(x) f_2(z-x) dx;$$
$$f(z) = \int_a^b f_1(z-y) f_2(y) dy. \qquad (3.50)$$

Подробнее остановимся на пределах интегрирования. Если x и y заданы во всем диапазоне от $-\infty$ до ∞, то пределы интегрирования соответственно равны $a = -\infty$, $b = \infty$. При сложении двух положительных случайных величин $a = 0$, $b = z$.

Представляет интерес частный случай, когда одна случайная величина x изменяется от $-\infty$ до ∞, а вторая y от 0 до ∞. Расчётные формулы для таких законов принимают вид:

$$f(z) = \int_{-\infty}^{z} f_1(z) f_2(z-x) dx,$$
$$f(z) = \int_0^{\infty} f_1(z-y) f_2(y) dy. \qquad (3.51)$$

Рассмотрим пример композиции нормального закона $f_1(x)$ со средним значением, равным нулю, и распределения Рэлея $f_2(y)$:

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_1^2} \right),$$

$$f_2(y) = \frac{y}{\sigma_2^2} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_2^2} \right).$$

Воспользуемся формулой (3.51), которая при подстановке $f_1(x)$ и $f_2(y)$ запишется в виде

$$f(z)=\frac{1}{\sigma_1\sigma_2^2\sqrt{2\pi}}\int_0^{\infty} y\,exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(z-y)^2}{\sigma_1^2}+\frac{y^2}{\sigma_2^2}\right]\right\}dy.$$

Обозначим $\sigma_1^2=\sigma_S^2\varepsilon^2$, $\sigma_2^2=\sigma_S^2(1-\varepsilon^2)$, тогда $\sigma_1^2+\sigma_2^2=\sigma_S^2$.

Здесь σ_s^2 – дисперсия нормального случайного стационарного процесса, а ε – коэффициент узкополосности процесса.

Запишем формулу для $f(z)$ с учётом σ_s^2 и ε:

$$f(z)=\frac{\varepsilon}{\sigma_S\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_S\varepsilon}\right)^2\right]+\frac{z\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\sigma_S^2}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_s}\right)^2\right]\Phi\left(\frac{z\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\sigma_S\varepsilon}\right). \quad (3.52)$$

Данное выражение представляет собой формулу Райса для плотности распределения максимумов нормального стационарного случайного процесса, полученную с использованием спектральных характеристик. Таким образом, выполненные преобразования доказывают, что плотность распределения максимумов нормального стационарного процесса является композицией случайных величин: первой, подчиняющейся нормальному закону со средним значением, равным нулю; второй – подчиняющейся распределению Рэлея.

При $\varepsilon = 0$ $f(z)$ переходит в распределение Рэлея, при $\varepsilon = 1$ получается нормальное распределение со средним значением, равным нулю. Сравнивая зависимость (3.52) с формулой для суперпозиции распределений, следует отметить их сходство; отличие заключается в том, что коэффициенты связаны функциональной зависимостью.

Пример 1. Суперпозиция законов распределения наработки до отказа тягового электродвигателя локомотива.

Отказы сборочных единиц многих видов машин могут вызываться не одной, а несколькими одновременно действующими причинами. В таких условиях суммарное распределение длительности работы до отказа объектов представляет собой суперпозицию (смесь) нескольких распределений. Например, статистические данные о длительности работы до отказа многих узлов локомотивов, в особенности тяговых электродвигателей (ТЭД), показывают, что в данном случае имеет место суперпозиция нормального и экспоненциального распределений.

Изоляция ТЭД может быть повреждена вследствие воздействия пиков перенапряжения, старения, увлажнения, механических повреждений и нагрева, т. е. комбинации повреждающих процессов (рис. 3.15).

Изоляция ТЭД может быть повреждена вследствие воздействия пиков перенапряжения, старения, увлажнения, механических повреждений и нагрева. Гистограмма на рисунке 3.16 подтверждает наличие такой суперпозиции. Поэтому суммарная плотность распределения описывается формулой

$$f(l)=c_1 f_1(l)+c_2 f_2(l), \tag{3.53}$$

где c_1, c_2 – доли отказов, распределенных соответственно по экспоненциальному и нормальному законам; $f_1(l)$, $f_2(l)$ – плотности распределения соответственно при экспоненциальном и нормальном законах.

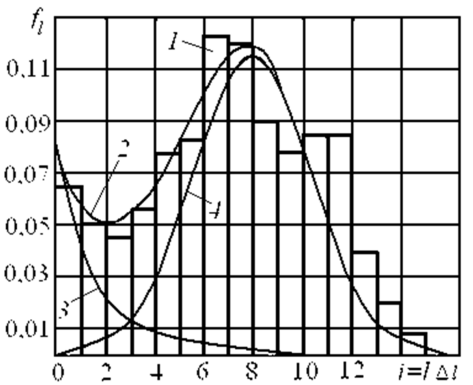


Рис. 3.15 – Гистограмма (*1*), суперпозиция (*2*), экспоненциальный (*3*) и нормальный (*4*) законы распределения наработки до отказа ТЭД ($\Delta l = 100 \cdot 10^3$ км)

$$f_1(l)=\frac{1}{L_{cp1}}exp\left(-\frac{l}{L_{cp1}}\right);$$

$$f_2(l)=\frac{1}{\sigma_l\sqrt{2\pi}}exp\left[-\frac{\left(l-L_{cp}\right)^2}{2\sigma_l^2}\right].$$

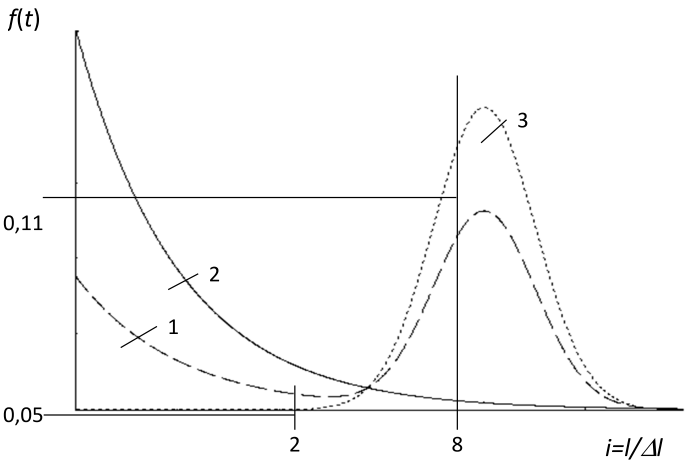


Рис. 3.16 – Суперпозиция (*1*), экспоненциальный (*2*) и нормальный (*3*) законы распределения наработки до отказа ТЭД ($\Delta l = 100 \cdot 10^3$ км)

Параметры c_1, c_2, L_{cp1}, L_{cp2}, входящие в выражение плотностей, могут быть определены по статистическим данным, т. е. по оценкам параметров суммарного распределения. Для этого следует составить систему пяти уравнений, одно из которых – условие нормировки $c_1 + c_2 = 1$. Четыре других уравнения получаются приравниванием первого начального, второго, третьего и четвёртого центральных статистических моментов соответствующим теоретическим. Решение полученной системы уравнений целесообразно искать численными способами с использованием методов итераций. Процедуру определения параметров можно значительно упростить использованием свойств и особенностей реальных сведений об эмпирическом **распределении и физических предпосылках моделей отказов.**

Пример 2.

В результате стендовых испытаний были получены наработки (ч) до разрушения 19 шестерен: 27; 54; 56; 64; 75; 81; 86; 99; 109,5; 144; 147; 168; 257; 294; 353; 368; 421; 434; 593. Первичная статистическая обработка показала, что данные об отказах группируются около двух максимумов: в интервале 50–150 ч и в интервале 360–450 ч.

Разобьем выборку на две части. Для первой выборки определим параметры распределения Вейбулла: L_0 = 100 ч, m = 2,1. Для второй выборки $\overline{L}$ = 160 ч и параметр сдвига L_c = 240 ч.

В результате статистической обработки получаем функцию распределения наработок шестерен, представленную в формуле

$$G(L) = c_1 = \{1 - \exp[-(L/L_0)^m]\} + (1 - c_1)\{1 - \exp[-(L - L_c)/\overline{L}]\},$$
$$c_1 = 12/19 = 0{,}63. \qquad (3.54)$$

Здесь аргумент L во втором слагаемом $L \geq 240$ ч. Результаты расчётов $G(L)$ приведены на рисунке 3.17.

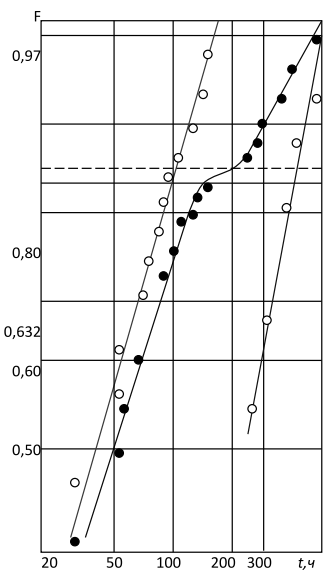


Рис. 3.17 – Суперпозиция распределений
(вероятностная бумага закона Вейбулла):
1 – первая выборка; *2* – суперпозиция;
3 – вторая выборка.

Для оценки согласия эмпирического и теоретического $G(L)$ распределений примем критерий А. М. Колмогорова.

Максимальное значение $D = 0{,}051$ наблюдается при $L = 54$ ч. Тогда $\lambda = 0{,}051 \cdot \sqrt{19} = 0{,}022$.

По таблице находим $P(0{,}022) = 1$, т. е. суперпозиция распределения $G(L)$ может быть использована для описания наработок шестерен.

Одной из важных задач статистической обработки экспериментальных данных является проверка ряда гипотез, например, проверка принадлежности опытных данных к определенному виду теоретического распределения. При выдвижении и принятии указанных гипотез могут иметь место следующие четыре случая:

– гипотеза верна и принимается;

– гипотеза верна, но ошибочно отвергается. Возникающую при этом ошибку называют ***ошибкой первого рода***, а вероятность её появления называют ***уровнем значимости*** и обозначают $\boldsymbol{\alpha}$;

– гипотеза неверна и отвергается;

– гипотеза неверна, но ошибочно принимается. Возникающую при этом ошибку называют ***ошибкой второго рода***, а вероятность её появления обозначают $\boldsymbol{\beta}$.

Разработано большое количество критериев для проверки гипотез. Некоторые из них справедливы лишь для определенных распределений, другие справедливы для широкого круга распределений. Наиболее универсальными считаются критерии Пирсона, Колмогорова, Романовского, Стьюдента и др., для которых при заданном уровне значимости α подсчитаны и составлены таблицы критических значений.

При этом область возможных значений каждого из критериев делят на две части, как это показано на рисунке 3.18:

– область принятия гипотезы;

– область непринятия гипотезы (так называемая критическая область), которая для различных критериев может быть левосторонней или правосторонней.

Порядок проверки статистических гипотез можно сформулировать так: если опытное значение критерия k_{on}, вычисляемое при заданном уровне значимости α, попадает в область принятия гипотезы, то гипотезу принимают. Если же опытное значение критерия попадает в критическую область, то гипотезу отвергают.

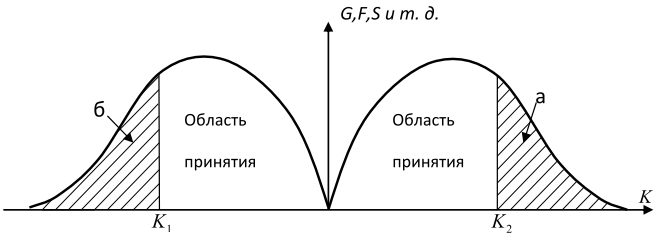


Рис. 3.18 – Левосторонняя (*а*) и правосторонняя (*б*) критические области:
K_1 и K_2 – критические точки (табличные значения критериев).

Уровню значимости α соответствует ***доверительная вероятность*** $P_д = 1 - \alpha$. При решении задач надёжности многих машин $P_д$ обычно принимается равной 0,95, и, следовательно, уровень значимости принимается равным $\alpha = 0{,}05$.

Рассмотрим наиболее широко распространенные критерии статистической оценки гипотез.

Критерий Пирсона (*критерий хи-квадрат*)

Критерий Пирсона считается наиболее удобным и универсальным. Он может быть использован для проверки допущения о любом распределении, даже в том случае, если неизвестны значения параметров распределения. Главный недостаток критерия – его нечувствительность к обнаружению адекватного распределения в случае, когда выборка невелика.

Критерий записывается в виде следующего альтернативного условия, отвечающего левосторонней критической области:

$$P_{оп}(\chi^2; k) = \begin{cases} \geq \alpha - \textit{гипотеза о принадлежности опытных данных} \\ \textit{к рассматриваемому закону не отвергается}; \\ < \alpha - \textit{гипотеза отвергается}; \end{cases}$$

где χ^2 вычисляется по формуле

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{k} \frac{(n_j - n_j^*)^2}{n_j^*}, \qquad (3.55)$$

где n_j – экспериментальные частоты попадания исходных данных в интервал; n_j* – теоретические частоты попадания в интервал по урав-

нению плотности распределения; $к$ – число степеней свободы, равное $к = К – Н$; $К$ – число интервалов гистограммы; $Н$ – число наложенных связей, равное $Н = П + 1$; $П$ – число параметров закона распределения.

При рассмотрении нормального распределения, например, необходимо знать два параметра – математическое ожидание и дисперсию ($П = 2$). Отсюда $Н = 2 + 1 = 3$.

Таким образом, рассматриваемый критерий – параметрический, он учитывает и значения, и число параметров распределения.

Ниже приведен порядок проверки согласия по критерию Пирсона.

1. Вычисляются значения χ^2; при этом последовательность вычислений соответствует нумерации столбцов таблицы 3.2.

Таблица 3.2 – Поэтапное вычисление χ^2

№ интервала	Эмпирическая частота попадания в интервал n_j	Теоретическая плотность распределения $f(L)$	Вероятность попадания эмпирических данных в интервал P_j	Теоретическая частота попадания в интервал n_j*	$(n_j–n_j*)$	$(n_j–n_j*)^2$	$\frac{(n_j–n_j*)^2}{n_j*}$
1	2	3	4	5	6	7	8

2. Вероятность попадания эмпирических данных в *j-й* интервал определяется по формуле

$$P_j = f(L)\,\Delta L. \tag{3.56}$$

3. Теоретическая частота попадания в интервал определяется по формуле

$$n_j* = n\,P_j. \tag{3.57}$$

4. По таблицам определяются значения вероятностей $P_{on}(\chi^2; k)$.

5. Задается доверительная вероятность $P_д$ или уровень значимости α.

6. Принимается заключение о согласованности эмпирических данных с выбранным законом теоретического распределения.

Критерий Романовского

Критерий Романовского записывается в виде следующего альтернативного условия, отвечающего правосторонней критической области:

$$K_p = \frac{|\chi^2 - k|}{\sqrt{2k}} = \begin{cases} \leq 3 - \textit{гипотеза о принадлежности опытных данных} \\ \textit{к рассматриваемому закону не отвергается}; \\ > 3 - \textit{гипотеза отвергается}; \end{cases} \quad (3.58)$$

где k – число степеней свободы.

Об адекватности теоретических и экспериментальных распределений можно судить не только по плотности вероятности, но и по функции распределения. Этот подход отражается в критерии Колмогорова.

Критерий Колмогорова

Критерий Колмогорова записывается в виде альтернативного условия, отвечающего левосторонней критической области:

$$P\left\{\max\left[F_э(L) - F_т(L)\right]\sqrt{n}\right\} = \begin{cases} \geq P - \textit{гипотеза о} \\ \textit{принадлежности опытных} \\ \textit{данных к рассматриваемому} \\ \textit{закону не отвергается}; \\ < P_д - \textit{гипотеза отвергается}; \end{cases} \quad (3.59)$$

где $F_э(L)$ – эмпирическая функция распределения, определяемая по формуле

$$F_э(L) = \frac{\sum_{j=1}^{k} n_j}{n}; \quad (3.60)$$

$F_т(L)$ – теоретическая функция распределения; n – объём выборки.

Суть метода, предложенного А. Н. Колмогоровым, заключается в том, чтобы найти из всей совокупности данных максимальное отклонение между эмпирической и теоретической функциями распределений (рис. 3.19).

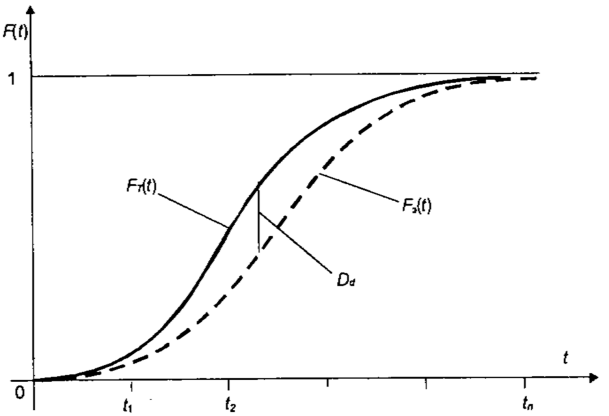


Рис. 3.19 – Эмпирическая и теоретическая функции распределения (к применению критерия Колмогорова)

Доверительные границы для параметров законов распределения и показателей надёжности

При обработке эмпирических данных о надёжности часто требуется найти не только точечную оценку, но и её точность и достоверность. Иными словами, требуется определить, к каким случайным ошибкам может приводить, например, замена параметра его оценкой. Оценка a является случайной величиной, поэтому можно указать определенную вероятность γ того, что истинное значение параметра a заключено между верхней $a_в$ и нижней $a_н$ доверительными границами. При этом вероятность γ рассчитывается по формуле

$$Вер\ \{a_н = a - e < a < a + e = a_в\} = \gamma. \qquad (3.61)$$

На практике основной интерес представляет односторонняя вероятность того, что параметр не меньше нижней или не больше верхней границы. Первое условие, в частности, относится к вероятности безотказной работы и средней наработке на отказ, второе – к среднему времени восстановления.

3.6. Корреляционный анализ экспериментальных данных

При анализе результатов экспериментальных исследований и контрольных измерений часто приходится рассматривать взаимную связь двух и более случайных величин. Эти величины могут быть независимыми, могут быть связанными функционально или стохастически (вероятностно).

Две случайные величины являются ***независимыми***, если закон распределения каждой из них не зависит от значения, которое приняла другая. Например, значение предела выносливости материала вала не зависит от скорости его вращения.

Величины являются ***функционально зависимыми***, если при известном значении одной можно точно указать значение другой. Так связаны, например, напряжения и деформации в упругодеформируемых деталях.

Наконец, случайные величины являются связанными ***вероятностной зависимостью,*** если известному значению одной величины соответствует не конкретное значение, а закон распределения другой. Вероятностные зависимости имеют место, когда величины зависят не только от общих для них, но и от разных случайных факторов. Они характеризуют тенденции изменения одной случайной величины в зависимости от изменения другой. Они могут быть более или менее тесными в пределах отсутствия зависимости и функциональной зависимости. Весьма наглядным примером вероятностной связи может служить зависимость между массой и ростом человека. В технике примерами являются связи между отдельными механическими характеристиками материалов, между параметрами деталей машины и др.

Изучение вероятностных зависимостей между случайными величинами составляет предмет ***корреляционного анализа,*** или, кратко, ***корреляции***. При корреляционном анализе определяют форму связи (прямолинейная или криволинейная) и силу или тесноту связи.

Полная информация о вероятностной связи двух случайных величин представляется совместной плотностью распределения $f(x, y)$ или условными плотностями распределения $f(x/y)$, $f(y/x)$, т. е. плотностями распределения случайных величин X и Y при задании конкретных значений y и x соответственно.

Для независимых случайных величин совместная плотность распределения $f(x, y)$ равна произведению плотностей распределения случайных величин X и Y, которое вычисляется по формуле

$$f(x, y) = f_x(x) f_y(y). \tag{3.62}$$

Основными характеристиками вероятностных зависимостей являются корреляционный момент и коэффициент корреляции.

Корреляционный момент (или момент связи) двух случайных величин X и Y – это математическое ожидание произведения центрированных случайных величин, и вычисляется он по формуле

$$K_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i (x_i - \overline{X})(y_i - \overline{Y})}{n-1}, \tag{3.63}$$

где X и Y – математические ожидания случайных величин X и Y.

Корреляционный момент одновременно характеризует связь между случайными величинами и их рассеивание. По своей размерности он соответствует дисперсии для независимой случайной величины.

Если случайные величины независимы, то корреляционный момент равен нулю, так как его можно представить как произведение центральных моментов случайных величин, которые равны нулю.

Если хотя бы одна из случайных величин имеет малое рассеяние, то корреляционный момент мал даже при явной зависимости между случайными величинами. Поэтому для выделения характеристики тесноты связи между случайными величинами переходят к ***коэффициенту корреляции*** r_{xy}, который рассчитывается по формуле

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{S_x S_y}, \tag{3.64}$$

где S_x и S_y – средние квадратические отклонения случайных величин X и Y.

Коэффициент корреляции, характеризуя степень тесноты связи случайных величин, может изменяться в пределах от –1 до +1. Чем ближе значение его абсолютной величины к единице, тем сильнее линейная связь между случайными величинами; чем ближе к нулю, тем эта связь слабее. При $r_{xy} = 1$ или $r_{xy} = -1$ статистическая линейная связь становится функциональной. При значениях, близких к нулю,

линейная корреляционная связь отсутствует. Для независимых случайных величин также $r_{xy} = 0$.

При более подробном анализе вероятностной связи определяют условные математические ожидания случайных величин, то есть математические ожидания случайных величин Y и X при заданных конкретных значениях x и y соответственно.

Зависимость условного математического ожидания от x называют регрессией Y по X. Зависимость от y соответствует регрессии X по Y.

Для нормального распределения величин X и Y уравнение регрессии X по Y имеет вид

$$\overline{X}_{yi} = \overline{X} + r_{xy}\frac{S_x}{S_y}(y_i - \overline{Y}), \qquad (3.65)$$

где X_{yi} – математическое ожидание X для некоторого заданного значения y_i.

Аналогичным образом записывается уравнение линии регрессии Y по X. В общем случае эти две линии регрессии не совпадают. Они сливаются только тогда, когда $r_{xy} = 1$.

Таким образом, корреляционный анализ дает возможность объективно оценивать влияние различных конструктивных, технологических и других факторов на показатели надёжности.

3.7. Регрессионный анализ экспериментальных данных. Метод наименьших квадратов

Основной характеристикой вероятностной связи между случайной величиной Y и неслучайной x является *регрессия*, т. е. зависимость математического ожидания Y от x. График этой зависимости называется ***линией регрессии***. ***Регрессионный анализ*** – нахождение этой зависимости по отдельным значениям величин, как правило, по экспериментальным точкам.

При анализе предполагают, что точно или приближенно соблюдаются следующие правила:

а) результаты измерений $y_1, y_2, y_3, ..., y_n$ представляют собой выборку объёмом n из нормально распределенной генеральной совокупности значений Y;

б) дисперсия случайной величины Y для любого значения независимой переменной x является постоянной;

в) независимая переменная x имеет малую ошибку по сравнению с ошибками результатов наблюдений;

г) вид функциональной зависимости $\hat{Y}(x)$ предварительно постулируют на основе каких-либо теоретических или практических зависимостей или выбирают в виде полинома.

Линейная зависимость между величинами или их логарифмами является наиболее распространенной. Оценкой линии регрессии является эмпирическая линия регрессии, уравнение которой имеет вид

$$\hat{Y} = b_0 + b_x . \tag{3.66}$$

где $\hat{Y}$, b_0 и b – оценки математического ожидания и коэффициентов регрессии соответственно.

Коэффициенты регрессии b и b_0 вычисляют с использованием ***метода наименьших квадратов*** с использованием формул (3.67) и (3.68). В основу метода положено требование минимизации квадратов отклонений результатов измерений случайной величины от линии регрессии:

$$\min\left\{u = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{Y})^2\right\}, \tag{3.67}$$

или после подстановки $\hat{Y}$:

$$\min\left\{u = \sum (y_i - b_0 - b_{xi})^2\right\}, \tag{3.68}$$

где y_i – реализация случайной величины в i-м измерении; x_i – значение независимой переменной в i-м измерении; n – количество измерений.

Известно, что минимум функции соответствует равенству нулю частных производных по всем неизвестным, показанным в:

$$\frac{\partial u}{\partial b_0} = -2\sum (y_i - b_0 - bx_i) = 0 ; \tag{3.69}$$

$$\frac{\partial u}{\partial b} = -2\sum (y_i - b_0 - bx_i) x_i = 0 . \tag{3.70}$$

Раскрывая скобки, проводим суммирование и после преобразований получаем систему уравнений из формул:

$$\begin{cases} nb_0 + b\sum x_i = \sum y_i ; & (3.71) \\ b_0 \sum x_i + b\sum x_i^2 = \sum y_i x_i . & (3.72) \end{cases}$$

Из решения системы получаем формулы для коэффициентов b и b_0, которые имеют вид:

$$b = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}; \tag{3.73}$$

$$b_0 = \frac{1}{n}\left(\sum y_i - b\sum x_i\right). \tag{3.74}$$

Уравнение эмпирической кривой нелинейной регрессии второго порядка имеет вид

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x + b_2 x^2. \tag{3.75}$$

По аналогии с линейной регрессией методом наименьших квадратов составляются нормальные уравнения, имеющие вид

$$\begin{cases} b_0 n + b_1 \sum x_i + b_2 \sum x_i^2 = \sum y_i, \\ b_0 \sum x_i + b_1 \sum x_i^2 + b_2 \sum x_i^3 = \sum x_i y_i, \\ b_0 \sum x_i + b_1 \sum x_i^3 + b_2 \sum x_i^4 = \sum x_i^2 y_i. \end{cases} \tag{3.76}$$

Решая систему нормальных уравнений, определяем коэффициенты регрессии b_0, b_1 и b_2.

По изложенной выше методике регрессионный анализ применяют для обработки результатов пассивного эксперимента, т. е. эксперимента, в котором невозможно назначать и поддерживать на выбранном уровне значения неслучайной величины. Более эффективным является активный эксперимент, позволяющий применять математическое планирование эксперимента и тем самым уменьшать время и число опытов.

3.8. Основы анализа случайных процессов

Для установления законов формирования переменных нагрузок, действующих на элементы машин и решения других прикладных задач для динамических систем машин, используются ***методы теории случайных функций.***

Случайными функциями описываются непрерывные случайные процессы, и если статические характеристики дискретизированного случайного процесса, соответствующие моменту времени t_1, не изменяются со временем и равны характеристикам, полученным в момент времени t_2, то процесс будет называться ***стационарным и эргодиче-***

ским. Отметим, что эргодический процесс всегда стационарный, но стационарный процесс не всегда является эргодическим.

В отличие от статистических характеристик случайных величин, представляющих собой определенные числа, характеристики случайных процессов являются в общем случае не числами, а функциями. Математическим ожиданием случайной функции $X(t)$ называется неслучайная функция $m_x(t)$, которая при каждом значении аргумента t представляет собой математическое ожидание соответствующего сечения случайного процесса (рис. 3.19). Значение дисперсии для каждого t равно дисперсии соответствующего сечения случайной функции.

Важнейшей характеристикой случайного процесса является его корреляционная функция – неслучайная функция двух аргументов $K_x(t_1, t_2)$, которая при паре значений t_1 и t_2 равна корреляционному моменту соответствующих сечений случайного процесса, определяемому по формуле (3.63).

При нахождении названных выше статистических характеристик случайной функции $X(t)$ рассматривают ряд сечений для равноотстоящих моментов времени и регистрируют значения, принимаемые функцией $X(t)$ в эти моменты времени.

Математическое ожидание определяют по формуле

$$m_x(t_k) = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{t=n} x_t(t_k). \qquad (3.77)$$

Дисперсию определяют по формуле

$$D_x(t_k) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{i=n}\left[x_1(t_k) - m_x(t_k)\right]^2. \qquad (3.78)$$

Корреляционный момент находят по формуле

$$K_x(t_k, t_l) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{i=n}\left[x_i(t_l) - m_x(t_k)\right]\left[x_i(t_l) - m_x(t_l)\right]. \qquad (3.79)$$

После того как для всех фиксированных значений t проведены вычисления по формулам (3.77)–(3.79), возможно построение зависимостей $m_x(t)$ (рис. 3.20), $D_x(t)$ и корреляционной функции $K_x(\tau_K)$. Все эти функции, как правило, аппроксимируются соответствующими аналитическими выражениями. График эргодического стационарного случайного процесса показан на рисунке 3.21.

В большинстве случайных процессов динамических систем можно выделить неустановившиеся и установившиеся режимы. Первые называются переходными процессами, и к ним можно отнести периоды пусков, торможений, резких изменений режимов и др. Эти процессы обычно бывают нестационарными: их статистические характеристики зависят от начала отсчёта времени. После перехода к установившемуся режиму случайные процессы могут считаться стационарными.

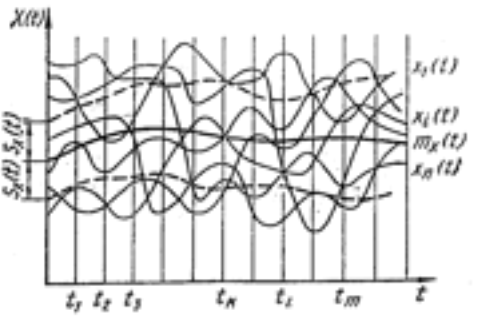


Рис. 3.20 – Случайная функция $X(t)$:
$m_x(t)$ – математическое ожидание; $S_x(t)$ – среднее квадратическое отклонение.

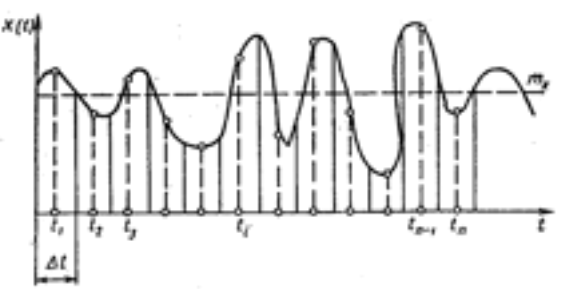


Рис. 3.21 – График эргодического
стационарного случайного процесса $X(t)$:
m_x – математическое ожидание.

Таким образом, стационарная случайная функция должна удовлетворять следующим требованиям:

$$\left.\begin{aligned} m_x(t) &= m_x = \text{const} \\ D_x(t) &= D_x = \text{const} \end{aligned}\right\} \tag{3.80}$$

Корреляционная функция для стационарного случайного процесса должна зависеть только от разности $\tau_K = t_1 - t_2$ между соседними значениями аргумента. Поэтому корреляционная функция будет иметь вид

$$K_x(t,\ t + \tau_K) = K_x(\tau_K). \tag{3.81}$$

Наиболее общей количественной характеристикой случайных процессов внешних воздействий на мобильные машины и случайных процессов откликов (напряжения, деформации и др.) в элементах их динамических систем является ***спектральная плотность, или энергетический спектр.***

Спектральную плотность (энергетический спектр) случайного процесса определяет преобразование Фурье корреляционной функции:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} K(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau. \tag{3.82}$$

Обратное преобразование Фурье определяет корреляционную функцию по энергетическому спектру:

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)\cdot e^{i\omega\tau}d\omega. \tag{3.83}$$

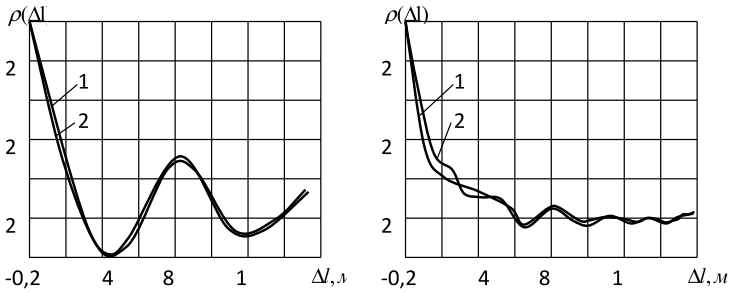
Поскольку для решения технических задач спектральную плотность процесса определяют только для положительных частот, то в этом случае используем формулы:

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi}\int_{0}^{\infty} K(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau; \tag{3.84}$$

$$K(\tau) = \int_{0}^{\infty} S(\omega)\cdot e^{i\omega\tau}d\omega. \tag{3.85}$$

Спектральная плотность для каждой частоты характеризует дисперсию гармонической составляющей исходного случайного процесса при данной частоте.

На рисунках 3.22 и 3.23 приведены графики корреляционных функций и спектральных плотностей микропрофилей специальных дорог Научно-исследовательского центра по испытаниям автомототехники (НИЦИАМТ – Автополигон НАМИ).



а *б*

Рис. 3.22 – Графики корреляционных функций микропрофилей дорог: *а* – профилированная булыжная дорога; *б* – бельгийская мостовая; *1* – эмпирическая модель; *2* – параметрическая модель.

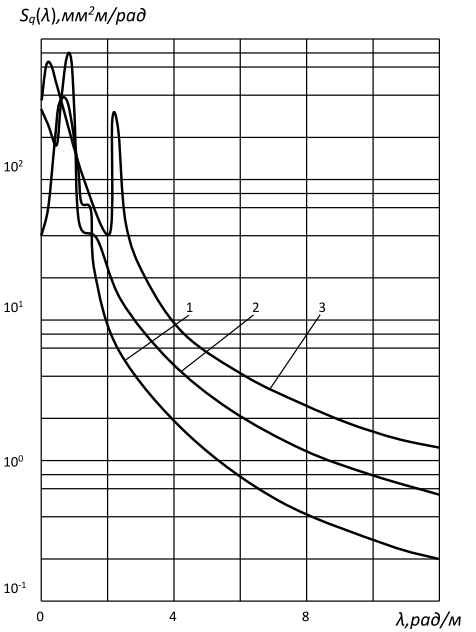


Рис. 3.23 – Спектральные плотности стационарных случайных функций микропрофилей дорог: *1* – булыжная ровного замощения; *2* – булыжная профилированная; *3* – бельгийская мостовая.

На рисунках 3.24 и 3.25 приведены графики спектральных плотностей стационарных случайных процессов воздействия одной и той же дороги при трех различных скоростях движения автомобиля и воздействия дорог различных типов при одной скорости движения.

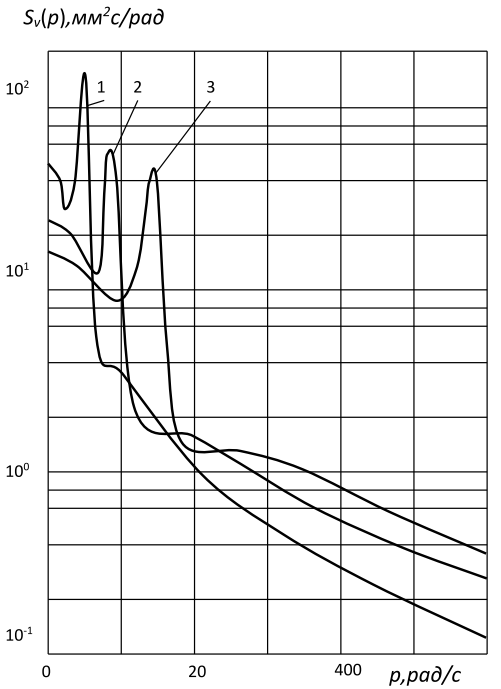


Рис. 3.24 – Спектральные плотности
стационарных случайных процессов воздействия микропрофиля
булыжной профилированной дороги
при различных скоростях движения:
1 – 20 км/ч; *2* – 40 км/ч; *3* – 60 км/ч.

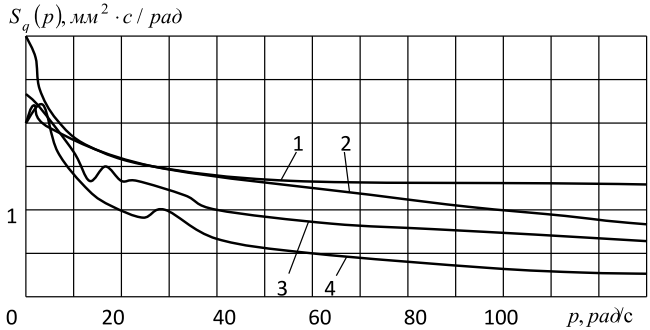


Рис. 3.25 – Спектральные плотности стационарных случайных процессов воздействия микропрофилей различных дорог при скорости движения 30 км/ч: *1* – покрытие из крупного булыжника; *2* – разбитая грунтовая дорога; *3* и *4* – булыжная мостовая соответственно с изношенным и удовлетворительным покрытиями.

В таблице 3.3 приведены зависимости для часто применяемых нормированных корреляционных функций и соответствующих им спектральных плотностей.

Таблица 3.3 – Взаимосвязи корреляционных функций и спектральных плотностей

K(τ)	*S(ω)*
$\frac{\sin\alpha\tau}{\alpha\tau}$	$1/\alpha$ $(0 \le \omega \le \alpha)$
$\frac{\sin\alpha\tau}{\alpha\tau}$ ($2\cos\alpha\tau - 1$)	$1/\alpha$ $(\alpha \le \omega \le 2\alpha)$
$e^{-\alpha\lvert\tau\rvert}$	$\frac{2}{\pi}\ \frac{\alpha}{\alpha^2+\omega^2}$
$e^{-\alpha^2\tau^2}$	$\frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{\omega^2}{4\alpha^2}\right)$
$e^{-\alpha\lvert\tau\rvert}\left(\cos\beta\tau+\frac{\alpha}{\beta}\sin\beta\lvert\tau\rvert\right)$	$\frac{4}{\pi}\ \frac{\alpha\left(\alpha^2+\beta^2\right)}{\left(\omega^2-\alpha^2-\beta^2\right)^2+4\alpha^2\omega^2}$

Продолжение табл. 3.3

$K(\tau)$	$S(\omega)$
$e^{-\alpha\lvert\tau\rvert}\left(\cos\beta\tau-\frac{\alpha}{\beta}\sin\beta\lvert\tau\rvert\right)$	$\frac{4\alpha\omega^2}{\pi*\left[\left(\omega^2+\alpha^2+\beta^2\right)^2-4\beta^2\omega^2\right]}$
$e^{-\alpha\lvert\tau\rvert}\cos\ \beta\tau$	$\frac{\alpha}{\pi}\ \frac{\omega^2+\alpha^2+\beta^2}{\left(\omega^2-\alpha^2-\beta^2\right)^2+4\alpha^2\omega^2}$
$e^{-\alpha^2\tau^2}\cos\beta\tau$	$\frac{1}{2\alpha\sqrt{\pi}}\left\{\exp\left[-\frac{(\omega+\beta)^2}{4\alpha^2}\right]+\exp\left[-\frac{(\omega-\beta)^2}{4\alpha^2}\right]\right\}$
$e^{-\alpha\lvert\tau\rvert}\left(ch\beta\tau+\frac{\alpha}{\beta}sh\beta\lvert\tau\rvert\right)$	$\frac{2\alpha\left(\alpha^2-\beta^2\right)}{\pi*[(\alpha-\beta)^2+\omega^2]*[(\alpha+\beta)^2+\omega^2]}$
$e^{-\alpha\lvert\tau\rvert}\left(ch\beta\tau-\frac{\alpha}{\beta}sh\beta\lvert\tau\rvert\right)$	$\frac{2\alpha\omega^2}{\pi*\left[(\alpha-\beta)^2+\omega^2\right]*\left[(\alpha+\beta)^2+\omega^2\right]}$

3.9. Основы применения информационных методов оценки и управления надёжностью

В 2001 г. впервые в теории и практике машиностроения коллективом российских учёных (В. Г. Григорович, С. В. Юдин, Н. О. Козлова, В. В. Шильдин) создана единая математическая база для анализа и управления качеством технологических процессов на основе информационных методов.

Любое информационное сообщение представляет собой совокупность сведений о некотором объекте или системе. Для получения количественной информации предназначены средства измерений, обладающие соответствующими информационными характеристиками, то есть измеряемая величина обладает неопределенностью до тех пор, пока не произведено измерение, т. е. полученная информация уменьшает неопределенность – энтропию системы.

Энтропией системы (измеряемой величины) называется сумма произведений вероятностей различных состояний системы на логарифмы этих вероятностей, взятая с обратным знаком:

$$H(X)=-\sum_{i=1}^{n}p_i\log p_i, \qquad (3.86)$$

где log – знак двоичного логарифма.

Знак минус ставится перед суммой для того, чтобы энтропия была положительной, поскольку значение любой вероятности меньше 1, а их логарифмы отрицательны.

Энтропия системы с равновозможными состояниями равна логарифму числа состояний. При увеличении числа состояний энтропия увеличивается.

Информационная мера Шеннона – Винера является универсальной статистикой: доказана эквивалентность дисперсионного и информационного анализов и что мощность статистики H не уступает мощности x^2-статистики.

В современной статистической теории информации формула количества информации выражает то разнообразие, которое один объект содержит о другом. Исходным понятием в теории информации считается понятие условной энтропии объекта X при заданном $Y - H(X/Y)$, которое можно интерпретировать как количество информации, необходимое для задания объекта X в ситуации, когда объект Y уже задан.

В настоящее время основными составными частями теории информации являются:

– статистическая термодинамика как математическая теория;

– теория информации К. Шеннона;

– теория оптимальных статистических решений.

Определение вида закона распределения случайной величины по опытным данным занимает одно из центральных мест при обработке результатов экспериментов статистическими методами. Традиционный подход при решении задачи сводится к расчёту параметров эмпирического распределения, принятию их в качестве оценок параметров генеральной совокупности с последующей проверкой сходимости эмпирического распределения с предполагаемым теоретическим по критериям χ^2 (Пирсона), λ (Колмогорова), ω^2. Такой подход имеет следующие недостатки: зависимость методики обработки результатов эксперимента от предполагаемого теоретического распределения, большой объём вычислений.

Более эффективным является метод, основанный на информационном подходе. Если имеется выборка с распределением частостей $p_1^*, p_2^*, \ldots, p_n^*$, то энтропия эмпирического распределения должна совпадать с энтропией предполагаемого теоретического распределения при верной нулевой гипотезе, т. е. должно выполняться равенство

$$-\sum_{i=1}^{n} p_i * ln\, p_i * = -\int_{-\infty}^{\infty} p_t\, ln\, p_t dx, \qquad (3.87)$$

где p_t – теоретическая вероятность распределения случайной величины X.

Недостаток метода состоит в том, что автором не предложено способа оценивания допустимого расхождения между эмпирической и теоретической энтропиями.

Предлагается новый подход к определению закона распределения случайной величины, основанный на свойстве независимости распределения оценки энтропии независимой случайной величины (НСВ) от закона её распределения, полученного традиционными статистическими методами.

Разобьем пространство значений исследуемой НСВ на конечное число $к$ частей (интервалов) x_1, x_2, ..., $x_к$, и пусть p_1, p_2, …, p_k – соответствующие значения гипотетической вероятностной функции, так что $p_i = P(X \in x)$ и $\sum_{i=1}^{k} p_i = 1$.

Система X, принимающая конечное множество состояний, характеризуется некоторой априорной неопределенностью.

Идея информационного метода определения закона распределения заключается в следующем. Поскольку оценка энтропии распределена по закону Гаусса, то гипотеза о совпадении эмпирического и предполагаемого теоретического распределения принимается, если вычисленное по результатам экспериментальных данных значение $\hat{H}(x)$ будет находиться в пределах доверительного интервала кривой нормального распределения с параметрами $M[\hat{H}]$ и $D[\hat{H}]$. Нормированная по среднеквадратическому отклонению оценки энтропии $\sqrt{D[\hat{H}(x)]}$ абсолютная разность $\left|H(x) - M[\hat{H}(x)]\right|$, которую обозначим через J_c, будет представлять собой случайную величину, подчиняющуюся закону Гаусса, с параметрами $M[J_c] = 0$; $D[J_c] = 1$. Из этого следует, что в качестве критерия проверки гипотезы о совпадении эмпирического и предполагаемого теоретического распределения можно использовать величину J_c:

$$J_c = \frac{\left|H(x) - M[\hat{H}(x)]\right|}{\sqrt{D[\hat{H}(x)]}}. \qquad (3.88)$$

Предельное значение J_c, при котором оценка энтропии $\hat{H}(x)$ должна находиться внутри доверительного интервала, зависит от выбранного уровня значимости α. Эта зависимость определяется известным соотношением $P(X \le t_{1-\alpha}) = \Phi(t_{1-\alpha})$, которое для данного случая будет иметь вид

$$P[|J_c| \le t_{1-\alpha}] = \Phi(t_{1-\alpha}), \tag{3.89}$$

где $\Phi(t\varphi) = (2/\sqrt{2\pi})\int_0^{t_\varphi} \exp(-t/2)dt$ – функция Лапласа.

При использовании информационного критерия необходимо учесть связь между непрерывностью теоретического распределения и дискретностью эмпирического распределения, возникающей при обработке эмпирических данных. Учитывая смещённость оценки $\hat{H}(x)$, эту связь можно выразить аналитически:

$$M[\hat{H}(x)] = h(x) - \ln\Delta x - (k-1)/2n. \tag{3.90}$$

Рассмотрим $\sum_{i=1}^{k} p_i \ln^2 p_i$.

Используя приближенное равенство $p_i \approx f(x)\Delta x$, а также обозначив через $a^2 = f(x)\ln^2 f(x)dx$, можем записать

$$\sum_{i=1}^{k} p_i \ln^2 p_i \cong a^2 - 2h(x)\ln\Delta x,$$

и окончательно

$$D[\hat{H}(x)] = (1/n)[a^2 - h^2(x)]. \tag{3.91}$$

Заменяя $M[\hat{H}(x)]$ и $D[\hat{H}(x)]$ их значениями, получим окончательную формулу информационного критерия согласия:

$$J_c = \frac{\hat{H}(x) - h(x) + \ln\Delta x - (k-1)/2n}{\sqrt{(1/n)(a^2 - h^2(x))}}. \tag{3.92}$$

Формула (3.92) – синтез информации, получаемой из результатов эксперимента $\hat{H}(x)$ и данных, зависящих от выдвигаемой гипотезы a^2, $h(x)$, являющихся константами, определяемыми заранее в зависимости от гипотезы.

В качестве примера вычислим энтропийные параметры $h(x)$ и a^2 экспоненциального распределения. Функция плотности вероятности экспоненциального распределения равна

$$f(x) = exp(-x).$$

Следовательно:

$$h(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\ln f(x)dx = \int_{0}^{\infty} e^{-x}\ln e^{-x}dx = \int_{0}^{\infty} xe^{-x}dx = 1;$$
$$a^2 = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\ln^2 f(x)dx = \int_{0}^{\infty} x^2 e^{-x}dx = 2. \qquad (3.93)$$

В таблице 3.4 приведены значения энтропийных параметров законов распределения, наиболее часто встречающихся в теории надёжности. Таблица энтропийных параметров различных законов распределения предоставляет возможность при применении информационного критерия согласия проверить одновременно несколько гипотез, что по существующим методикам сделать без дополнительных расчётов нельзя.

Таблица 3.4 – Энтропийные параметры законов распределения

№ п/п	Закон	Функция плотности	$h(x)$	$H_H(x)$	$a^2 - h^2$
1	Гаусса	$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$	$\ln\sigma\sqrt{2\pi e}$	1,4189	0,5
2	Рэлея	$f(x)=\frac{1}{\sigma^2}e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}};$ $\sigma=\frac{\sigma_x}{\sqrt{2-(\pi/2)}}=\frac{\sigma_x}{0.655}$	$\ln\sigma(e/\sqrt{2})+c/2;$ $c=0.5772157$	0,9420	0,4112
3	Максвелла	$f(x)=\sqrt{\frac{2\pi}{e}}\frac{x^2}{\sigma^3}e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}};$ $\sigma=\frac{\sigma_x}{\sqrt{3-(8/\pi)}}=\frac{\sigma_x}{0.673}$	$\ln\sigma\sqrt{\frac{2\pi}{e}}+c=\ln\frac{\sigma_x\sqrt{2\pi e}}{2\sqrt{1-\frac{2}{\pi}}}+c$	0,9961	0,4348
4	Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda x}$	$Ln(e/\lambda)=ln(\sigma e)$	1,0	1,0
5	Вейбулла	$f(x)=\frac{mx^{m-1}}{b_m}e^{\left[-(x/b_m)^m\right]}$	$ln\frac{b_m e}{m}+\left(1-\frac{1}{m}\right)C$	–	$\left(1-\frac{1}{m}\right)^2\frac{\pi^2}{6}+\left(\frac{2}{m}-1\right)$

Продолжение табл. 3.4

№ п/п	Закон	Функция плотности	$h(x)$	$H_H(x)$	$a^2 - h^2$
6	Гамма-распределение	$f(x)=\frac{x^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}\lambda^{\alpha}e^{-\lambda x}$, x>0	$\Gamma(a)-(a-1)\psi(a)+a\ln\frac{e}{\lambda}$	–	$2\text{-}a+(a\text{-}1)^2\psi'(a)$
7	Модуля нормального центрированного	$f(x)=\frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}}exp^{(-x^2/2\sigma^2)}$, x>0	$\ln\frac{\sigma}{2}\sqrt{2\pi e}=\ln\left(\frac{\sigma_x\sqrt{2\pi e}}{2\sqrt{1-2/\pi}}\right)$	1,2319	0,5
8	Лапласа двусторонний экспоненциальный	$f(x)=\frac{\lambda}{2}e^{-\lambda\|x\|}$, -∞<x<∞	$\ln\frac{2e}{\lambda}=\ln(\sigma_x e\sqrt{2})$	1,3466	1,0

В таблице использовались следующие обозначения: $\Gamma(a)$-гамма-функция; $\psi'(a)$ – тригамма-функция; C = 0,5772157 – постоянная Эйлера.

Для большинства формул законов распределения НСВ с использованием энтропии характерно наличие СКО $s(x)$, по своему математическому и физическому смыслу близкого к энтропии. Это позволяет выдвинуть гипотезу о возможности расчёта показателей рассеивания с помощью энтропии. Возникает задача оценки точности результатов расчёта выборочного СКО по сравнению с известными формулами:

$$S_n=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}, \qquad (3.94)$$

если выборка не группируется по интервалам, или

$$S_k=\sqrt{\frac{1}{n-1}\left(\sum_{i=1}^{k}(f_i\bar{x}_i^2-n\bar{x}^2)\right)}. \qquad (3.95)$$

при разбиении выборки на k интервалов.

В формулах (3.94) и (3.95): n – объём выборки; x_i – i-я реализация случайной величины X; $\bar{x}$ – выборочное среднее; $\bar{x}_i$ – значение середины i-го интервала; f_i – частота попадания в i-й интервал.

Любые методы определения или нормирования точности средства измерений сводятся к установлению соответствия с погрешно-

стью измерений. С точки зрения информационного подхода к измерениям средства измерений сравниваются по количеству информации, получаемой при измерении, а следовательно, по энтропийному значению погрешности измерений.

Рассмотрим вариант нормально распределенной случайной величины. Оценка $S(x)$ среднего квадратического отклонения $\sigma(x)$ может быть получена:

$$S_{\hat{H}} = \frac{\Delta x}{\sqrt{2\pi e}} e^{-\sum_{i=1}^{k} \hat{p}_i \ln \hat{p}_i} . \qquad (3.96)$$

Наиболее характерным примером использования информационных методов является метрологическое обеспечение процессов контроля показателей надёжности. При этом точность измерений характеризуется числовым значением полученных при измерении или априорно известных погрешностей измерений.

Пусть в результате однократного измерения значения измеряемой величины X результат измерения равен x_u. Если известно, что средство измерений имеет случайную абсолютную погрешность в пределах $\pm\Delta$, то не следует утверждать, что действительное значение измеряемой величины равно x_u. Можно лишь утверждать, что это значение лежит в полосе $x_u \pm \Delta$. Незнание истинного значения измеряемой величины сохраняется после получения результата измерения x_u, но теперь оно характеризуется не исходной энтропией $H(X)$, а лишь энтропией разброса действительного значения X величины относительно полученного результата x_u. Эта условная энтропия $H\left(\frac{X}{x_u}\right)$ определяется погрешностью данного средства измерений.

В теории информации факт проведения измерений в диапазоне от $X_н$ (нижняя граница) до $X_в$ (верхняя граница) означает, что при использовании данного средства измерений может быть получен результат измерений x_u только в пределах от $X_н$ до $X_в$. Другими словами, вероятность получения значения x_u, меньших $X_н$ и больших $X_в$, равна 0. Вероятность же получения результата x_u в пределах $X_н$ и $X_в$ равна 1.

Если предположить, что плотность распределений различной измеряемой величины вдоль всей шкалы средства измерений одинакова, то с точки зрения теории информации наше знание о значении

измеряемой величины до измерения может быть представлено графиком распределения плотности $f_1(x)$ вдоль шкалы значений (рис. 3.26).

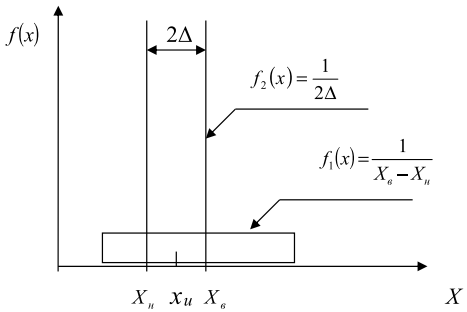


Рис. 3.26 – Плотность распределения погрешности фиксированного средства измерений

После проведения измерения из-за наличия погрешности средства измерений (±Δ) действительное значение измеряемой величины X лежит в пределах от $X_н - \Delta$ до $X_в + \Delta$, т. е. в пределах участка 2Δ.

С информационной точки зрения интерпретация результата измерения состоит в том, чтобы область неопределенности простиралась от $X_н$ до $X_в$ и характеризовалась сравнительно узкой плотностью распределения $f(x)$. После измерения неопределенность уменьшилась до величины 2Δ, а плотность распределения увеличилась до величины $f_2(x)$ с учётом того, что $\Delta \ll (X_н - X_в)$, что и отражено на рисунке 3.25.

Получение какой-либо информации об интересующей нас величине заключается в конечном счёте в уменьшении неопределенности её значения.

Определить количество информации в общем случае можно по формуле

$$I_x = H(X) - H\left(\frac{X}{x_и}\right), \qquad (3.97)$$

где $H(X)$ – априорная энтропия; $H\left(\frac{X}{x_и}\right)$ – условная энтропия.

Полученное количество информации вычисляется по формуле

$$I_x = \log(X_в - X_н) - \log 2\Delta = \log\frac{X_в - X_н}{2\Delta} = -\log\frac{2\Delta}{X_в - X_н}. \qquad (3.98)$$

Данная операция, которая обычно используется для определения относительной погрешности измерения, характеризует один из основных приемов анализа информационных свойств измерений.

Таким образом, с точки зрения теории информации количество информации, получаемое в результате любого измерения, соответствует уменьшению неопределенности «познания» измеряемой величины и равно разности энтропии до и после проведения измерений. При этом априорная энтропия $H(X)$ зависит только от закона распределения различных значений измеряемой величины, рассматриваемой как случайная, а условная энтропия $H\left(\frac{X}{x_u}\right)$ равна энтропии закона распределения погрешностей измерений.

При исследовании средств измерений удобнее оперировать энтропийным значением погрешности измерений, которое однозначно определяет ограничение процесса, связанного с измерением параметра (параметров) объекта измерений.

Выше было показано, что погрешность измерения равна логарифму интервала неопределенности. Эта длина может быть выражена также через значение СКО погрешности измерения. Для равномерного распределения дисперсия определяется следующим образом:

$$D_x = \int_{-\Delta}^{\Delta}(x-m)^2 \cdot f(x) = \int_{-\Delta}^{\Delta} x^2 \cdot f(x)dx - 2m_x \int_{-\Delta}^{\Delta} x \cdot f(x)dx + m_x^2 \int_{-\Delta}^{\Delta} f(x)dx =$$

$$= \frac{1}{2\Delta} \cdot \frac{x^3}{3}\Bigg|_{-\Delta}^{\Delta} - 2m_x \cdot \frac{1}{2\Delta} \cdot \frac{x^2}{2}\Bigg|_{-\Delta}^{\Delta} + m_x^2 \cdot \frac{1}{2\Delta} \cdot x\Big|_{-\Delta}^{\Delta} = \frac{1}{6\Delta} \cdot \left(\Delta^3 + \Delta^3\right) - \frac{m_x}{2\Delta} \cdot \left(\Delta^2 + \Delta^2\right) + \frac{m_x^2}{2\Delta} \cdot (\Delta + \Delta) =$$

$$= \frac{2\Delta^3}{6\Delta} - \frac{2m_x\Delta^2}{2\Delta} + \frac{2m_x^2\Delta}{2\Delta} = \frac{\Delta^2}{3} - m_x\Delta + m_x^2, \tag{3.99}$$

и окончательно принимает вид

$$D_x = \frac{\Delta^2}{3} - \frac{\Delta^2}{2} + \frac{\Delta^2}{4} = \frac{\Delta^2}{12}. \tag{3.100}$$

Отсюда СКО определяется по формуле

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}. \tag{3.101}$$

Таким образом, $\Delta = 2\sqrt{3} \cdot \sigma_x$, а интервал неопределенности $2\Delta = 4\sqrt{3} \cdot \sigma_x$. Чем меньше СКО, тем меньше неопределенность результатов измерений. Условная энтропия равна

$$H\left(\frac{X}{x_u}\right) = \log 4\sqrt{3} \cdot \sigma_x. \qquad (3.102)$$

За энтропийное значение погрешности измерений принимается наибольшее её значение при равномерном законе распределения, которое «вносит» такое же дезинформационное действие, как и погрешность с данным законом распределения. Так, если погрешность измерений распределена нормально, то энтропийное значение $\Delta_э$ погрешности определяется по формуле

$$\Delta_э = \frac{\sqrt{2\pi e} \cdot \sigma_x}{2} \approx 2{,}07\sigma_x. \qquad (3.103)$$

Зависимость между энтропийным и средним квадратическим значениями погрешности имеет вид

$$\Delta_э = k_э \cdot \sigma_x, \qquad (3.104)$$

где $k_э$ – энтропийный коэффициент: для нормального закона распределения погрешностей измерений $k_э \approx 2{,}07$; для равномерного закона $k_э = \frac{\Delta_э}{\sigma_x} \approx 1{,}73$.

Сравнение значений энтропийных коэффициентов нормально и равномерно распределенных погрешностей измерений позволяет сделать вывод о том, что при одинаковых СКО погрешность (при нормальном законе распределения) вносит большее дезинформационное действие, чем погрешность, распределенная равномерно.

4. Повреждающие процессы и работоспособность

Закономерности, характеризующие повреждающие процессы в материалах деталей изделия и приводящие к изменению их начальных свойств, являются основой для расчёта и прогнозирования показателей надёжности.

Зависимости, описывающие изменение свойств и состояния материалов, можно разделить на две основные группы. Во-первых, это взаимосвязи обратимых процессов, когда после прекращения действия внешних факторов материал (и, соответственно, деталь, узел) возвращается в исходное состояние. Эти зависимости называют ***законами состояния***. Во-вторых, это закономерности, которые описывают необратимые процессы и, следовательно, позволяют оценить те изменения начальных свойств материалов, которые происходят или могут происходить в процессе эксплуатации изделия. Такие зависимости называют ***законами старения***.

Законы состояния можно разделить на статические, когда в функциональную зависимость, описывающую связь между входными и выходными параметрами, фактор времени не входит, и на переходные процессы, где учитывается изменение выходных параметров во времени. Типичными примерами статических законов состояния могут служить закон Гука, закон теплового расширения твердых тел и др. Статические законы, описывающие изменение состояния изделия, хотя и не включают фактор времени, могут быть использованы для расчётов показателей надёжности, если известны изменения характеристик изделия в процессе эксплуатации.

Законы состояния, описывающие переходные процессы, например колебания упругих систем, процессы теплопередачи и другие, включающие фактор времени, также не учитывают изменений, происходящих при эксплуатации изделий. Обычно они относятся к категории быстропротекающих процессов или процессов средней скорости. Лишь при всех известных параметрах внешних воздействий законы состояния можно использовать для решения задач надёжности.

Основное значение для количественной оценки потери изделием работоспособности имеет изучение законов накопления повреждений, которые раскрывают физико-химическую сущность необратимых изменений, происходящих в материалах изделия. Хотя законы накопления повреждений всегда связаны с фактором времени, в некоторых из них время непосредственно не фигурирует, так как в полу-

ченных зависимостях обнаруживается связь с другими факторами (например, с энергией), которые в свою очередь проявляются во времени. Такие зависимости называют ***законами превращения***.

Типичными примерами законов превращения могут служить зависимости, описывающие процессы коррозии, ползучести металлов и др. Вывести закономерности, непосредственно отражающие, например, изменение величины коррозии во времени, весьма затруднительно вследствие поливариантности коррозионных процессов, когда большое число факторов оказывает одновременное и часто противоположное действие на интенсивность повреждающего процесса.

Фактор времени здесь фигурирует в неявном виде, и для получения закона накопления повреждений в чистом виде (т. е. в функции времени) необходимо дальнейшее раскрытие механизма конкретного процесса изменения свойств и состояния материалов.

Закономерности, оценивающие степень повреждения материала в функции времени, являются основой для решения задач надёжности. Они позволяют прогнозировать ход повреждающего процесса, оценивать возможные его реализации и выявлять наиболее существенные факторы, влияющие на интенсивность процесса. Типичным примером таких зависимостей являются закономерности изнашивания материалов, которые на основе раскрытия физической картины взаимодействия поверхностей дают методы прогнозирования интенсивности изнашивания или величины износа в функции времени и оценивают параметры, влияющие на ход процесса. Анализируя исследования последних лет, следует отметить, что всё чаще стремятся получить зависимости, описывающие повреждающие процессы как функцию времени.

Так, выявлены закономерности, оценивающие как функции времени процессы коррозии, скорость развития усталостных трещин, скорость протекания процессов ползучести, зависимости, описывающие изменения свойств масел в процессе их эксплуатации, изменения коэффициента трения при работе сопряжения, деформации отливок под действием остаточных напряжений, изменение свойств полимерных материалов и др.

Многие временные закономерности физико-химических процессов могут быть получены на основе рассмотрения кинетики термоактивационных процессов.

Для большинства машин основной причиной потери работоспособности в процессе эксплуатации является износ деталей и сопряже-

ний. Многое сделано для раскрытия закономерностей, описывающих процессы изнашивания. В исследованиях по изучению процессов изнашивания материалов основное внимание уделяется описанию и трактовке явлений, которые происходят на поверхности трения: решаются задачи о характере касания и взаимодействия поверхностей, изучаются процессы разрушения материалов и отделения частиц, исследуются структурные изменения в поверхностных слоях и т. д. Но, кроме этого, необходимо рассматривать внешние проявления процессов, происходящих на поверхности трения, установить зависимости, которым подчиняется распределение давлений и линейного износа на поверхности трения, выяснить изменение взаимного положения сопряженных деталей, которое происходит в результате их изнашивания. Именно эти данные, которые являются следствием процессов, происходящих на поверхности трения, нужны конструкторам и эксплуатационникам машин для решения инженерных задач, так как они связывают износ материалов со служебными свойствами деталей, механизмов и машин, определяющими в конечном итоге конструкцию и размеры сопряжений.

При решении задач, связанных с изнашиванием материалов деталей, необходимо учитывать, что конструкция сопряжения оказывает влияние на распределение износа по поверхности трения и на характер взаимодействия изношенных поверхностей. Во многих случаях влияние конструктивных факторов на форму изношенной поверхности проявляется в большей степени, чем влияние закономерностей изнашивания материалов. При проектировании машин конструктор должен располагать методами расчёта на износ различных сопряжений, характерных для данной машины, чтобы обосновать выбор той или иной конструкции.

Разработаны методы расчёта элементов и механизмов машин по критерию изнашивания, которые позволяют: связать износ поверхности с геометрическими, кинематическими и силовыми параметрами сопряжений; рассчитать форму изношенной поверхности, учесть приработку неточно выполненных и деформированных тел, оценить изменение сил и характера эпюры давлений, которое происходит при изнашивании; рассчитать износ жестко связанных (статически неопределимых) сопряжений и, следовательно, опираясь на закономерности изнашивания материалов, рассчитать при проектировании машин те изменения, которые происходят в машине при изнашивании её элементов. Разработаны также методы расчёта, которые свя-

зывают износ сопряжений с выходными параметрами механизма или машины, например, с точностью осуществления заданной траектории перемещения рабочего органа машины, с динамическими нагрузками, возникающими в машине, и др.

Для расчёта и прогнозирования надёжности мобильных машин с учётом износа отдельных сопряжений и механизмов необходимо:

– рассчитать износ конкретного сопряжения с индивидуальными конструктивными особенностями с учётом вероятностного характера всех явлений и действующих факторов;

– оценить влияние износа сопряжений на выходные параметры машины;

– произвести расчёт требуемых показателей надёжности.

Состояние машины, прежде всего, характеризуется её работоспособностью. Показатель, характеризующий возможную работоспособность машины в любой момент её эксплуатации, назовем ***потенциалом работоспособности.***

Под потенциалом работоспособности машины понимают её состояние в фиксированный момент времени, характеризующее возможную её работоспособность, которая оценивается изменением суммарных затрат на производство и последующие ремонты. Общий потенциал работоспособности машины можно представить в виде следующих трёх составных частей: активной, резервной и пассивной.

Активная часть потенциала P_a изменяется в процессе эксплуатации машины, поддерживается и восстанавливается в результате проведения технического обслуживания и текущего ремонта. Комплекс работ, который выполняется для поддержания машины в работоспособном состоянии, называется техническим обслуживанием. Текущий ремонт осуществляется для восстановления гарантированного обеспечения работоспособности машины и состоит в том, что некоторые её элементы, узлы и агрегаты заменяются, восстанавливаются, а затем проводится их регулировка.

Резервная часть потенциала P_p необходима для предупреждения наступления предельного состояния машины при эксплуатации.

Пассивная часть потенциала P_n представляет собой незаменяемую часть машины в течение срока службы и материализуется в виде конструкции, материала деталей и трудовых затрат на сборку, окраску и т. п. Пассивная часть потенциала изменяется при замене базовых узлов и агрегатов из-за разрушения или предупреждения возможного разрушения деталей при эксплуатации машины.

С учётом изложенного, видимо, «идеальным» вариантом изменения работоспособности машины в эксплуатации за срок её службы явился бы вариант, который приведен на рисунке 4.1. Здесь начальный потенциал работоспособности P машины определяется как $P_{\max}$.

Пассивная часть потенциала работоспособности соответствует тому состоянию машины, когда достигается её предельное состояние, при котором эксплуатация прекращается.

Идеализация модели, представленной на рисунке 4.1, состоит в следующем:

– снижение потенциала работоспособности машины за весь срок её службы происходит до фиксированного минимального уровня, независимого от общей наработки машины;

– восстановление потенциала работоспособности при всех восстановлениях происходит до уровня, присущего новой машине;

– объёмы работ по техническому обслуживанию и ремонту практически не зависят от длительности эксплуатации машины.

Активная часть потенциала определяется по формуле

$$P_a = P_{\max} - P_{\min}, \tag{4.1}$$

где $P_{\max}$ и $P_{\min}$ – соответственно исходный и минимальный допустимый уровень снижения работоспособности машины в эксплуатации.

Резервная часть потенциала определяется равенством

$$P_p = P_{\min} - P_n, \tag{4.2}$$

где P_n – пассивная часть потенциала работоспособности машины.

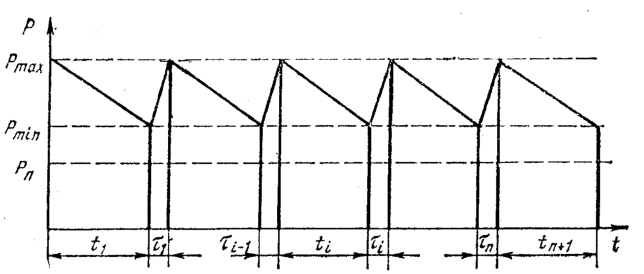


Рис. 4.1 – Идеальная модель изменения и восстановления потенциала работоспособности машины:
t_i – i-е периоды эксплуатации; τ_i – периоды времени, занятые i-м ремонтом.

Очевидно, что в реальных условиях модель, представленная на рисунке 4.1, возможна лишь при затратах, несоизмеримо превышающих экономический эффект от эксплуатации машины. Для моделирования жизненного цикла машины более реальной является модель, показанная на рисунке 4.2.

В результате действия большого количества детерминированных и случайных факторов процесс изменения и восстановления потенциала работоспособности носит случайный характер. Поэтому для множества «одинаковых» машин этот процесс в общем виде можно рассматривать как случайный процесс с перемешиванием его реализаций, и на рисунке 4.2 представлен его частный случай.

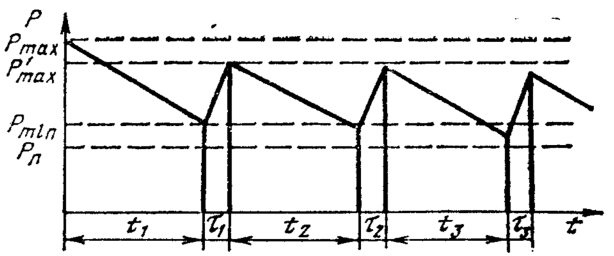


Рис. 4.2 – Реальная модель изменения и восстановления потенциала работоспособности мобильной машины

Используя положения теории случайных процессов, можно рекомендовать выборочную функцию математического ожидания изменения работоспособности машин для текущего момента времени, представленную в формуле

$$\tilde{m}_p(t) = P_{\max} \cdot e^{-\upsilon t}, \tag{4.3}$$

и функцию выборочной дисперсии, представленную в формуле

$$\tilde{D}_p(t) = t(\alpha_1 + \alpha_2 \cdot t), \tag{4.4}$$

где $\upsilon, \alpha_1, \alpha_2$ – показатель степени и коэффициенты, определяемые экспериментально.

Распределения доремонтного и межремонтного ресурсов часто аппроксимируются нормальным законом.

Рассмотрим случай, представленный на рисунке 4.3, когда задано время непрерывной работы машины T_o, в течение которого не производится её техническое обслуживание. Это продолжительность

смены (технологические машины), длительность рейса (транспортные машины), время до текущего ремонта или другой период, определяемый условиями эксплуатации.

Пусть X – один из параметров, характеризующих работоспособность машины (мощность, КПД, производительность и др.), а δ – та часть, на которую параметр может быть изменен (ухудшен) без выхода его за допустимые пределы. Значение δ учитывает запас на накопление деградационных отказов и определяет те допустимые погрешности в работе машины, которые не приводят к нарушению её работоспособности. Процесс изменения параметра X с течением времени t, т. е. процесс изменения состояния машины, представляет собой общую модель постепенной потери машиной работоспособности, происходящей при её эксплуатации. В основе рассматриваемой модели лежит классификация процессов повреждения по скорости их протекания.

Каждая машина имеет начальные погрешности, которые зависят от её конструкции, степени совершенства изготовления и определяют начальную неточность функционирования a_o. Эта неточность наблюдается и в том случае, если отсутствуют процессы, изменяющие параметры машины.

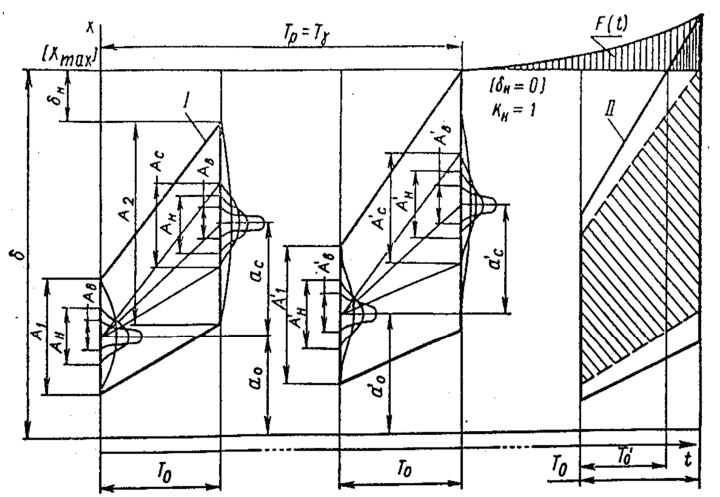


Рис. 4.3 – Схема потери машиной работоспособности при заданной продолжительности непрерывной работы

Как только машина начинает работать, быстропротекающие процессы приводят к дальнейшему увеличению погрешностей функционирования. Так как имеет место случайный характер этих процессов, то изменение параметров машины будет оцениваться законом распределения и его полем рассеивания A_1. Границы интервала A_1, как и других областей рассеивания, определяются принятыми допустимыми значениями вероятности попадания параметра X в заданную область.

Если имеется несколько одновременно действующих факторов, то суммарный эффект может быть оценен вероятностным методом сложения дисперсий отдельных процессов. Так, при начале работы машины могут действовать две основные причины, поэтому происходит рассеивание параметра X относительно центра группирования a_o в пределах поля $A_н$ за счёт погрешностей изготовления и настройки машины и рассеивания параметра X в пределах поля $A_в$ в результате вибраций машины или деформаций её элементов при работе в различных режимах. В этом случае поле рассеивания A_1 параметра X будет складываться из $A_н$ и $A_в$. Применяя теорему о сложении дисперсий независимых случайных величин, приведённую в формуле (4.5), получим

$$A_1 = \sqrt{A_н^2 + A_в^2}\,. \tag{4.5}$$

Здесь рассеивание происходит относительно центра группирования, определяемого координатой a_0.

Влияние процессов средней скорости проявляется в том, что центр группирования смещается за период T_o на величину a_c (на схеме условно изображено линейным) и имеет рассеивание. Поэтому $a_c(t)$ следует рассматривать как случайную функцию времени с зоной рассеивания A_c. Из процессов средней скорости часто ведущую роль играют тепловые деформации.

Зона рассеивания A_2 относительно смещённого центра группирования вычисляется по формуле

$$A_2 = \sqrt{A_н^2 + A_в^2 + A_c^2}\,. \tag{4.6}$$

Таким образом, к концу периода T_o остается неизрасходованный резерв $\delta_н$ и по параметру X, определяемый по формуле

$$\delta_н = \delta\left[\alpha_o + \alpha_c + 0{,}5\cdot\sqrt{A_н^2 + A_в^2 + A_c^2}\right]. \tag{4.7}$$

Поле рассеивания параметра X за этот период определяется областью состояния I, показанной на рисунке 4.3.

Запас долговечности $K_н$ можно определить как отношение максимально допустимого значения параметра $X = X_{max} = \delta$ к экстремальному его значению для данных условий $X_{эк} = \delta - \delta_н$, выраженного формулой

$$K_н = \frac{X_{max}}{X_{эк}} = \frac{\delta}{\delta - \delta_н}. \quad (4.8)$$

Следует подчеркнуть, что в данном случае экстремальное значение параметра X определено допустимой вероятностью значения, которое может принимать данный параметр, а не оценкой физических процессов потери изделием работоспособности.

При наличии запаса $K_н > 1$ или, что то же самое, резерва $\delta_н$, долговечность машины весьма высока, так как вероятность выхода параметра X за пределы δ мала (меньше её регламентированного значения). Опасность представляют лишь внезапные отказы от внешних воздействий, не связанных с состоянием самой машины.

Однако при продолжительной эксплуатации машины начинают проявляться медленно протекающие процессы, такие как изнашивание, коррозия и другие, которые приводят к уменьшению запаса долговечности.

Изменение параметров, определяющих работоспособность машины, будет происходить со временем в результате следующих причин:

– увеличение зоны $A_в$ – в результате роста зазоров в сопряжениях, изменения жесткости и других характеристик, влияющих на быстропротекающие процессы;

– увеличение зоны $A_н$ – в результате износа и старения настроечных узлов машин;

– увеличение $a_о$ – вследствие износа и других изменений, которые имеют место в основных сопряжениях и узлах машин. Обычно это главный параметр, влияющий на снижение работоспособности машины;

– увеличение $a_с$ и $A_с$ – в результате повышения тепловыделения из-за интенсификации процессов трения, возрастания нагрузок и других явлений, происходящих при изнашивании механизмов.

Функциональную зависимость каждого процесса во времени можно определить в результате испытаний или путём расчёта и про-

гнозирования. Эти зависимости могут быть линейными (как это упрощенно изображено на рис. 4.3) или нелинейными функциями. Например, температурные деформации, как правило, подчиняются зависимости, близкой к экспоненциальной, когда со временем происходит их стабилизация.

При длительной эксплуатации машины происходит увеличение зоны рассеивания её параметров (область *II*), что приводит к увеличению вероятности выхода параметра X за пределы допуска, т. е. к уменьшению вероятности безотказной работы машины.

Предельное состояние машины наступит в момент времени, при котором запас долговечности будет израсходован, $K_н = 1$ (или $\delta_н = 0$). Время работы $t = T_\gamma$ до потери машиной работоспособности и будет являться ресурсом по данному параметру. Это будет гамма-процентный ресурс, так как ему соответствует регламентированная вероятность безотказной работы.

Начиная с момента времени $t = T_\gamma$ машина нуждается в ремонте для полного или частичного восстановления утраченной работоспособности.

Если по каким-либо причинам эксплуатация машины продолжается и вероятность отказа $F(t)$ превышает допустимое значение, то можно принять одно из следующих решений (рис. 4.3, справа):

– уменьшить допустимое время непрерывной работы до значений $T'_o < T_o$, при котором $\delta_н = 0$;

– облегчить режим работы машины с тем, чтобы было обеспечено $\delta_н \geq 0$ (заштрихованная зона);

– допустить увеличение опасности отказа машины, усилив контроль за её функционированием.

Все эти меры являются временными, так как приводят к снижению эффективности работы машины (например, её производительности) и к увеличению затрат на обслуживание. Поэтому ресурс машины $T_р = T_\gamma$ определяется её наработкой до $K_н = 1$, т. е. до такого состояния, при котором последующая эксплуатация машины не обеспечит регламентированного значения вероятности безотказной работы γ при непрерывной эксплуатации машины в течение заданного периода T_o.

Типичными примерами машин, для которых заранее регламентировано время работы до очередной подналадки и технического обслуживания, являются автомобили (T_o – км пробега), самолёты

(T_o – полётные часы), технологические машины (количество выпущенной продукции).

Это наиболее типичный случай эксплуатации машин, так как с точки зрения организации системы ремонта и технического обслуживания и удобства эксплуатации более целесообразно иметь равные, заранее запланированные периоды непрерывной работы машины.

Основными повреждающими деградационными процессами при эксплуатации машин являются: изнашивание, коррозия, усталость, эрозия и старение. Заметим, что здесь порядок перечисления процессов изнашивания, коррозии и усталости весьма условно связан с их «взносом» в деградацию деталей машин. Например, усталостные отказы, более редкие по частоте возникновения, имеют существенно более высокий уровень опасности для людей, связанных с эксплуатацией транспортных машин. Кроме того, отметим, что в большинстве случаев повреждающие процессы действуют совместно.

4.1. Изнашивание

Около 30% мировых энергетических ресурсов в различных формах расходуется на преодоление сил трения, до 90% подвижных сопряжений машин выходят из строя вследствие износа. При этом снижаются КПД, точность, экономичность, показатели надёжности машин, ухудшаются динамические и акустические характеристики, т. е. практически все характеристики, формирующие технический уровень изделий.

Процесс взаимодействия поверхностей при их относительном движении изучает ***трибология*** – научно-техническая дисциплина, объединяющая проблемы трения, изнашивания и смазки. Термин в 1966 г. предложил профессор Н. Джост (Великобритания).

Виды трения

Трибология выделяет следующие виды трения: сухое, граничное, полусухое, полужидкостное и жидкостное.

Сухое трение возникает при отсутствии смазки и загрязнений между трущимися поверхностями. Обычно сухое трение сопровождается скачкообразным взаимным перемещением поверхностей.

Граничное трение наблюдается в том случае, когда поверхности трущихся тел разделены слоем смазки, который называется граничным. Толщина слоя составляет от размера одной молекулы

до 0,1 мкм. Наличие граничного слоя снижает силы трения от двух до десяти раз по сравнению с сухим трением и уменьшает скорость изнашивания сопряженных поверхностей в сотни раз. Вязкость масла не влияет на процесс граничного трения. При заданном сочетании трущихся материалов действие смазки характеризуется её маслянистостью, которая определяет прочность масляной плёнки.

Полусухое трение – это смешанное трение, когда на площади контакта тел трение местами граничное, а на остальной части сухое.

Жидкостное трение характеризуется тем, что трущиеся поверхности полностью разделены слоем смазки, в которой вследствие относительного движения деталей и определённой формы зазора возникает давление, уравновешивающее внешнюю нагрузку. Слои смазки, находящиеся от поверхности на расстоянии свыше 0,5 мкм, имеют возможность свободно перемещаться один относительно другого. При жидкостном трении сопротивление движению складывается из сопротивления скольжению слоев смазки относительно друг друга по толщине смазочного слоя и зависит от вязкости смазочной жидкости. Этот режим характеризуется весьма малым коэффициентом трения и является оптимальным для узла трения в отношении его износостойкости.

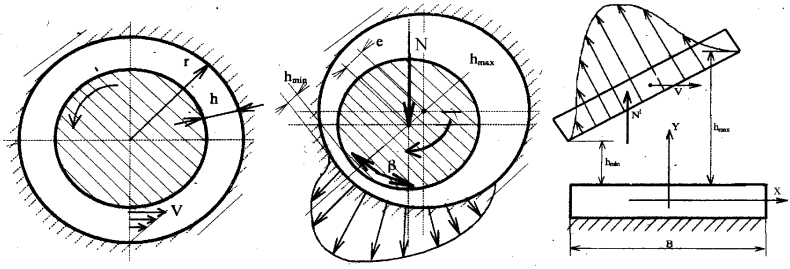
Полужидкостное трение происходит в условиях наличия смазочного слоя толщиной от 0,1 до 0,5 мкм.

В отличие от сухого, граничного и смешанных видов трения при жидкостном (гидродинамическом) режиме смазки трущиеся поверхности полностью разделены слоем масла. При этом минимальная толщина слоя h должна быть больше, чем суммарная высота наиболее высоких микронеровностей обеих поверхностей, определяется неравенством

$$h_{\min} > \left(R_{\max_1} + R_{\max_2} \right). \qquad (4.9)$$

К узлам трения скольжения, в которых применяют гидродинамическую смазку, относятся радиальные и упорные подшипники скольжения, цилиндро-поршневые пары, плоские, V-образные и цилиндрические направляющие и другие устройства.

Работоспособность таких устройств обеспечивается за счёт гидродинамического эффекта, проявление которого рассмотрим на примере устройства радиального подшипника, представленного на рисунке 4.4.



а *б* *в*

Рис. 4.4 – Схема гидродинамики подшипников скольжения

Если зазор подшипника, показанный на рисунке 4.4*а*, заполнен смазкой, а к шипу, представленному на рисунке 4.4*б*, приложена сила N, то вал, естественно, смещается из центрального положения и образует эксцентриситет между валом и отверстием в виде клинового (сужающегося) зазора.

Поскольку вал вращается, то в граничащей с ним зоне смазка увлекается в сужающийся зазор, сжимается в узком горле зазора и создает подъемную силу, удерживающую шип от контакта с подшипником.

Масла, как известно, являются вязкими жидкостями, поэтому за счёт их адгезии с движущимися поверхностями в слое смазки образуется трение, механизм которого был описан Ньютоном.

Ньютон предположил, что, согласно закону вязкого течения жидкостей, сила внутреннего трения F_τ в слое смазки при ламинарном режиме течения прямо пропорциональна производной $\frac{dVx}{dz}$ вязкости и площади смазочного слоя и определяется по формуле

$$F_\tau = \eta S \frac{dVx}{dz}, \qquad (4.10)$$

где η – динамическая вязкость смазки, Па·с; $\frac{dVx}{dz}$ – поперечный градиент скорости; S – площадь сдвигаемых слоев смазки.

Если скорость V в направлении, перпендикулярном течению, меняется по линейному закону, показанному на рисунке 4.5, то $dV/dz = V/h$, где h – высота смазочного слоя.

В таком случае формулу (4.10) можно записать в виде формулы

$$F = \eta \cdot \frac{VS}{h}. \qquad (4.11)$$

Сила сопротивления трения, определяемая сдвигом слоев смазки (сдвиговая вязкость) в подшипниках, впервые была аналитически определена профессором Н. П. Петровым. Она вычисляется по формуле

$$F_{mp} = \eta \frac{s \cdot V}{h + \eta / \lambda_1 + \eta / \lambda_2}, \qquad (4.12)$$

а момент трения M_{mp} с учётом радиуса шипа R определяется по формуле

$$M = \eta \frac{s \cdot V}{h + \eta / \lambda_1 + \eta / \lambda_2} \cdot R, \qquad (4.13)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты связи жидкости с шипом и подшипником; η – динамическая вязкость; h – толщина смазочного слоя.

Из формул (4.12) и (4.13) видно, что сила и момент трения увеличиваются с ростом вязкости, угловой скорости, с увеличением радиуса, площади подшипника и с уменьшением зазора. Наиболее значительно на силу и момент трения влияет радиус подшипника.

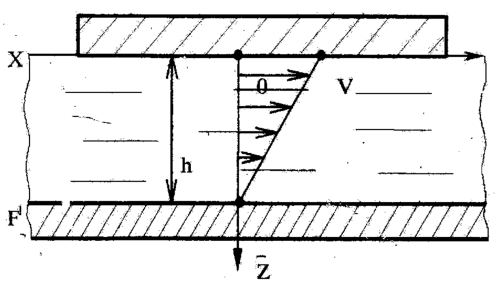


Рис. 4.5 – Схема течения жидкости между двумя параллельными пластинами

Вязкость смазки, как это следует из результатов многочисленных исследований, существенно зависит от молекулярного строения и является функцией температуры, давления и плотности.

Для обеспечения надёжной работы подшипников в гидродинамическом режиме при малых значениях коэффициента трения опре-

деляют целесообразные значения вязкости η, скорости U и удельной нагрузки $P_{пог}$ проектируемых подшипников, используя диаграмму зависимости коэффициента трения $f_{тр.}$ от показателя $\eta\frac{U}{p_{пог.}}$, предложенную Герси и Штрибеком.

Число Герси иногда представляют в виде $\eta\frac{\omega}{p_a}$, где ω – угловая скорость, а P_a – удельная нагрузка в подшипнике.

Диаграмма Герси – Штрибека приведена на рисунке 4.6.

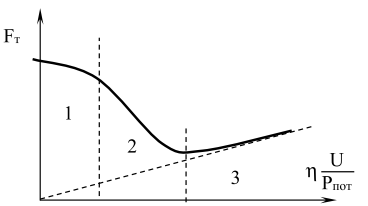


Рис. 4.6 – Диаграмма Герси – Штрибека:
1 – зона граничной смазки; *2* – зона смешанного (полужидкостного) трения; *3* – зона гидродинамической смазки.

Вероятность реализации гидродинамического или граничного режима можно приближенно оценивать по критерию λ, представляющему собой отношение минимальной толщины $h_{\min}$ смазочного слоя в зоне сужения зазора между трущимися деталями (рис. 4.5) к характеристике высоты неровностей рабочих поверхностей этих деталей и выражающемуся формулой

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}}, \qquad (4.14)$$

где Ra_1 и Ra_2 – параметры шероховатости рабочих поверхностей контактирующих деталей.

Чем больше величина λ, тем больше вероятность устойчивости режима жидкостной смазки и меньше вероятность непосредственного контакта вершин неровностей поверхностей трения. При $\lambda > 3$ имеет место гидродинамический (и вообще, жидкостной) режим смазки, при $\lambda < 1$ – граничный, при $1 < \lambda < 3$ – режим смешанной (полужидкостной) смазки.

В ряде случаев, в частности для нестационарно нагруженных подшипников, удобнее использовать критерий λ, определяемый формулой

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{Rz_1 + Rz_2}}, \qquad (4.15)$$

где Rz_1 и Rz_2 – параметры высоты шероховатости соответственно первой и второй контактирующих поверхностей.

Следует отметить, что иногда в одной и той же трущейся паре наблюдаются различные виды трения. Так, например, в двигателе внутреннего сгорания стенки цилиндров в нижней части смазываются обильно, вследствие чего при движении поршня до середины хода трение колец и поршня о стенку цилиндра приближается к жидкостному. Далее трение становится полужидкостным, а при движении поршня вблизи верхней мертвой точки (особенно при такте впуска) условия смазки колец и поршня резко ухудшаются, так как оставшаяся на стенках цилиндра масляная плёнка претерпевает изменения под воздействием высокой температуры продуктов сгорания. Особенно плохо смазывается верхняя часть цилиндра. После пуска холодного двигателя возможно граничное и даже сухое трение компрессионных колец о стенки цилиндра, что является одной из причин повышенного износа цилиндров в верхней части.

Виды фрикционных связей

Взаимодействие поверхностей трения имеет двойственную молекулярно-механическую природу. ***Механическое*** взаимодействие сопровождается зацеплением, соударением, взаимным внедрением микронеровностей. При относительном перемещении поверхностей трения происходит смятие, выглаживание и срезание выступов микронеровностей. Кроме того, разрушаются окисные плёнки, и в контакте оказываются незащищенные поверхности соприкасающихся металлов, что создает благоприятные условия для ***молекулярного*** взаимодействия. Последнее проявляется в виде адгезии и схватывания вследствие взаимной диффузии атомов в кристаллические решетки металлов в местах контакта при трении.

Различают пять видов ***фрикционных связей***, под которыми понимают пятна касания, которые существуют некоторое время, а затем меняют свои места. Виды фрикционных связей показаны на рисун-

ке 4.7. Связи *а*, *б* и *в* получаются при механическом взаимодействии, а *г* и *д* – при молекулярном. В зависимости от степени адгезии и отношения глубины внедрения h к радиусу R внедряющейся неровности происходит:

– упругое оттеснение металла (*а*);

– пластическое оттеснение металла (*б*);

– срез внедрившимся материалом (*в*);

– схватывание пленок и их разрушение (*г*);

– схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием металла (*д*).



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 4.7 – Виды фрикционных связей

Переход от одного вида фрикционных связей к другому зависит от температуры поверхностей трения, сил молекулярного взаимодействия, а также от глубины взаимного внедрения неровностей, влияющего на характер механического взаимодействия поверхностей, физико-механических свойств металлов и микрорельефа поверхностей трения.

Упругое оттеснение металла происходит в результате упругой деформации отдельных микронеровностей на поверхности трения, когда нагрузка воспринимается этими микровыступами. Сначала они деформируются упруго, а при дальнейшем увеличении нагрузки – пластически, вызывая ***пластическое оттеснение металла.*** Поверхностные слои металла при таком деформировании упрочняются, микронеровности выглаживаются. Повторное нагружение поверхности вызывает пластическую деформацию этих выступов уже при большей нагрузке. В результате многократного повторного деформирования в поверхностном слое металла сначала образуется строчечная структура, а затем после использования всех плоскостей скольжения металл в этом слое приходит в состояние перенаклёпа и становится хрупким. Многократные растягивающие напряжения, возникающие в поверхностном слое под действием сил трения, приводят к

образованию микротрещин на поверхности, которые разрастаются и вызывают отделение фрагментов с тонкого упрочненного хрупкого слоя, образуя частицы износа.

Микрорезание происходит в том случае, когда на поверхности трения имеется твердая частица продуктов износа либо контактирующий выступ, который внедряется на глубину от 0,2 до 0,3 R. Микрорезание наблюдается редко, так как при допускаемых нагрузках на трущиеся пары глубина внедрения частиц для этого недостаточна.

Состояние фрикционных связей $г$ и $д$ зависит от соотношения прочности плёнки и прочности основного металла, а также от напряженного состояния поверхностного слоя металла.

Виды изнашивания

Изнашиванием называется процесс отделения материала с поверхности твердого тела и/или увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и/или формы тела.

Виды изнашивания обычно подразделяются на две группы: механическое – вследствие механического взаимодействия, и коррозионно-механическое – в результате механического взаимодействия, сопровождаемого химическим и/или электрохимическим взаимодействием материала со средой.

Механическое изнашивание в свою очередь включает следующие виды: абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, гидроэрозионное, газоэрозионное, электроэрозионное, кавитационное, усталостное, адгезионное, изнашивание при фреттинге и др.

Абразивное изнашивание – такое изнашивание поверхности детали, которое происходит в результате режущего или царапающего действия твердых тел или частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. При таком изнашивании материал удаляется с изнашиваемой поверхности в виде очень мелкой стружки, или в виде фрагментов ранее деформированного поверхностного слоя при пластически деформированной царапине, или в виде осколков, хрупко отделяющихся при однократном или многократном воздействиях.

Абразивные частицы могут попасть на поверхности трения из продуктов износа, вместе с пылью, топливом или смазкой, внедриться в поверхность при обработке её абразивным инструментом. В роли абразива выступают также отделившиеся частицы рабочих поверхно-

стей. Основным источником попадания абразива является воздух. В одном кубическом метре воздуха содержится от 0,04 до 5 г пыли, на 60–80% состоящей из взвешенных частиц минералов, имеющих размеры от 5 до 20 мкм, т. е. соизмеримых с зазорами в сопряжениях. Основные составляющие пыли: двуокись кремния SiO_2, окислы железа FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4 и соединения алюминия, кальция, магния, натрия. Частицы могут обладать высокой твердостью, превышающей твердость рабочих поверхностей большинства деталей.

Интенсивность абразивного изнашивания прямо пропорциональна твердости абразива H_a и обратно пропорциональна твердости металла $H_{мет}$:

– при $H_a < (0{,}7–1)H_{мет}$ скорость изнашивания незначительная;

– при $H_a > (1{,}3–1{,}7)H_{мет}$ износостойкость не зависит от твердости абразива.

Скорость скольжения, если не приводит к заметному нагреву контакта, мало влияет на величину износа.

Абразивному изнашиванию подвержены очень многие детали: около 40% деталей мобильных машин имеют чисто абразивный износ и более 50% – абразивный износ в сочетании с другими видами износа и разрушений поверхностного слоя. Особенно сильно ему подвержены детали машин, работающих в строительстве, горнодобывающих отраслях, в сельскохозяйственном и лесном комплексах, или детали машин, часто передвигающихся колоннами по дорогам без покрытия.

Среди методов повышения износостойкости при абразивном изнашивании можно назвать совершенство фильтрации воздуха и циркулирующей смазки, гальванические покрытия; анодирование; поверхностное насыщение (цементация, цианирование, азотирование); поверхностный наклёп; изготовление заготовок и деталей кокильным литьём; закалку; лазерное упрочнение, напыление (в том числе керамики).

Усталостное изнашивание возникает под действием переменных напряжений, которые в общем случае не превышают предела текучести металла. Ему подвержены зубчатые передачи, подшипники качения и скольжения, кулачковые механизмы, рельсы и бандажи колесных пар подвижного состава железнодорожного транспорта и др.

Процесс усталостного изнашивания протекает в следующей последовательности:

– на трущейся поверхности образуются усталостные микротрещины, распространяющиеся наклонно к поверхности;

– масло попадает в микротрещины, и, когда наружная часть трещины вступает в контакт с сопряженной поверхностью, выход для масла закрывается, и внутри трещины возникает высокое давление, расклинивающее трещину;

– при повторных нагружениях трещина углубляется, а затем оттесняется к поверхности, при этом отделяется некоторый объём выкрашивающегося металла и образуются мелкие оспины – ***питтинг***;

– увеличение числа оспин приводит к увеличению контактного давления, пластической деформации остальных неровностей и интенсивному изнашиванию поверхности.

Под действием контактных переменных напряжений может произойти и другой вид повреждений – ***отслаивание***, т. е. отделение чешуек металла в том случае, когда трещина, зародившаяся в глубине металла, выходит на поверхность. Отслаивание твердого слоя наблюдается на цементированных, цианированных, азотированных и закаленных поверхностях. Отслаивание иногда удается ликвидировать увеличением толщины упрочненного слоя. На процесс отслаивания влияют остаточные напряжения от термообработки и напряжения, возникающие при деформации детали.

Усталостное изнашивание имеет внешние проявления в виде увеличения шума и вибраций.

Условия возникновения и кинетика развития усталостного изнашивания зависят от напряжённо-деформированного состояния поверхностных и подповерхностных слоёв материала, физико-механических свойств материала, физико-химических свойств смазочных материалов и окружающей среды, толщины смазочного слоя, формы и размеров сопрягающихся деталей. Повышенные значения пределов упругости, текучести, вязкости смазочного материала, твёрдости несущей области материала снижают выкрашивание.

Эмпирическое соотношение для времени t работы сопряжения при усталостном изнашивании определяется выражением

$$t = \frac{A}{\sigma_m^m}, \tag{4.16}$$

где A – постоянная, характеризующая физико-механические свойства материала и режим работы сопряжения; σ_m – максимальное упругое напряжение в поверхностном слое; m – параметр кривой усталости.

Адгезионное изнашивание **(*изнашивание при заедании*)** происходит при схватывании металлов в процессе трения с образованием прочных металлических связей в зонах непосредственного контакта

поверхностей. Необходимым условием для образования узла схватывания является разрушение масляной плёнки. Площадь схватывания зависит от площади сцепления. При наличии смазки интенсивность изнашивания зависит от вязкости, температуры масла и его дисперсности, наличия и толщины окисных плёнок.

При адгезии возможны следующие три вида разрушения узлов в зоне схватывания:

– срез по поверхности контакта, происходящий в случае, когда прочность связи меньше прочности металлов пары трения. При этом с обеих поверхностей трения удаляется сравнительно мало металла, хотя коэффициент трения может достигать большой величины;

– срез в толще менее прочного металла, наблюдаемый, когда соединение прочнее одного из металлов. При этом частицы металла налипают на более твердую поверхность;

– срез в толще менее прочного металла с вырыванием частиц из более прочного металла – в том случае, если соединение прочнее обоих металлов.

Наиболее сильная форма схватывания приводит к задирам или к заеданию, вследствие чего на поверхностях трения остаются широкие и глубокие борозды с неровными краями, наблюдаются вырывания металла, образуются наросты. В результате может наступить полное заклинивание деталей.

Заедания происходят в тяжелонагруженных подшипниках, в зубчатых зацеплениях, в цилиндро-поршневых группах двигателей. В подшипниках качения задиры могут возникать в результате скольжения тел качения по дорожкам качения и по бортам колец. В зубчатых передачах задиры образуются при разрыве масляной плёнки вследствие чрезмерно высокой контактной нагрузки или в том случае, когда температура достигает критической величины для смазки данного сорта. Задиры на рабочей поверхности цилиндров и на поршнях двигателей внутреннего сгорания могут происходить в результате искажения геометрической формы зеркала цилиндров, перегрева поршня, неудовлетворительной смазки, повышенного нагарообразования и т. п.

Эрозионное изнашивание происходит в результате воздействия на поверхность детали движущегося с большой скоростью потока жидкости, газа, твердых частиц. Механизм эрозионного повреждения металла состоит в том, что при контакте со струей образуются плёнки окислов, которые при трении потока о металл разрушаются и удаля-

ются с поверхности. При этом на поверхности образуются пятна, полосы, вымоины. Таким повреждениям подвергаются детали системы охлаждения двигателя, оперения кузова, воспринимающие со стороны колес поток воды, песка и мелких камней.

Интенсивность эрозионного изнашивания определяется по формуле

$$I = K \cdot \nu^m, \tag{4.17}$$

где K – коэффициент, зависящий от вида абразива и свойств жидкости или газа; ν – скорость потока жидкости или газа; m – показатель, зависящий от материала детали (для стали Ст3 m = 2,3; для закаленной стали Ст45 m = 2,5; для белого чугуна m = 2,8).

Интенсивность эрозионного изнашивания зависит от скорости потока, угла атаки с изнашивающейся поверхностью, механических свойств и концентрации воздействующих частиц, агрессивности среды-носителя, физико-механических и химических свойств поверхностных и приповерхностных слоев материала.

Разделяют эрозионное разрушение при гидроабразивном и газоабразивном воздействии среды, а также ***электроэрозионное изнашивание*** в результате воздействия на поверхность разрядов электрического тока.

Гидроабразивное изнашивание имеет место в различных деталях гидромашин, патрубках и т. д. в результате трения потока жидкости о поверхность и ударного воздействия твердых частиц, переносимых потоком. Механическое воздействие при этом может сочетаться с коррозионным и кавитационным разрушениями.

Газоабразивное изнашивание происходит в результате воздействия твердых частиц, увлекаемых газовым потоком, и типично для газовых турбин, пневматических и выхлопных систем транспортных средств.

Кавитационное изнашивание возникает при относительном движении твердого тела и жидкости в условиях кавитации. Кавитация наблюдается в жидкости при падении давления в ней до давления насыщенных паров, когда нарушается сплошность потока жидкости и образуются кавитационные пузыри. В момент достижения предельного размера они начинают захлопываться с большой скоростью, что приводит к микровзрывам – гидравлическому удару о поверхность металла. Сосредоточение в одном месте на поверхности металла

большого количества таких ударов и вызывает кавитационные разрушения в виде *каверн* диаметром от 0,2 до 1,2 мм.

Кавитационному изнашиванию подвержены детали системы охлаждения двигателя, патрубки, детали гидромашин, рабочие колеса насосов, гребных винтов, лопасти гидротурбин.

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от условий зарождения и увеличения кавитационных пузырьков, процесса их захлопывания и интенсивности кавитационных ударов, от свойств материалов и покрытий, от кинематических и динамических параметров потока. Местные неровности, волнистости, шероховатости, выступы способствуют возникновению процесса кавитации. Значительное влияние на кавитационный процесс оказывают скорость потока жидкости и вибрация контактирующих с жидкостью деталей.

Изнашивание при фреттинге – это механическое изнашивание мест проскальзывания плотно контактирующих поверхностей, находящихся под нагрузкой при колебательных, циклических, возвратно-поступательных относительных перемещениях с малыми амплитудами.

Коррозионно-механическое изнашивание возникает при трении материалов, вступающих в химическое взаимодействие с окружающей средой. Изнашивание в этом случае происходит под влиянием одновременно протекающих процессов поверхностного разрушения от механического и коррозионного факторов. Интенсивность коррозионно-механического изнашивания зависит от природы контактирующих материалов, их коррозионной стойкости, состава окружающей среды, от взаимодействия материалов со средой, смазочными материалами, с активными компонентами (присадками).

Для уменьшения эффекта коррозии используют углеродные материалы, искусственные графиты, полимеры с наполнителями, нержавеющие стали и сплавы, материалы неметаллической группы.

Среди видов коррозионно-механического изнашивания можно назвать окислительное и при фреттинг-коррозии.

Окислительное изнашивание происходит в том случае, когда кислород, содержащийся в воздухе (трение без смазки) или в смазке (трение со смазкой), вступает во взаимодействие с металлом и образует на нем окисную плёнку, которая при трении истирается или отрывается от металла и удаляется со смазкой, а затем образуется вновь.

Примером окислительного изнашивания может служить изнашивание верхней части цилиндров двигателей внутреннего сгорания

при действии коррозии, происходящей при низкой температуре стенок, особенно при работе непрогретого двигателя.

Разрушение в случае ***изнашивания при фреттинг-коррозии*** заключается в образовании на поверхностях взаимного касания деталей язвинок и продуктов коррозии в виде порошка или налета. Изнашивание при этом зависит от одновременно протекающих процессов микросхватывания, усталостного, коррозионно-механического и абразивного воздействия. Повышается величина шероховатости, образуются налипания, каверны, микротрещины, снижается предел выносливости детали.

Фреттинг-коррозия возникает в заклепочных, болтовых, шлицевых, шпоночных, штифтовых соединениях, прессовых посадках деталей, шарнирах, соединениях муфт, клапанах, кулачковых механизмах и пр. Примером в автомобиле может служить фреттинг-коррозия, возникающая в местах относительного скольжения листов рессор. Нанесение неметаллических покрытий, использование прокладок, коррозионностойких материалов уменьшает интенсивность данного вида изнашивания.

Существенное влияние на процесс изнашивания оказывает водород, выделяемый в зоне контакта в условиях высоких температур водой, смазочными и другими углеводородными материалами. Водород имеет свойство концентрироваться в зонах высоких температур. Атомы водорода, просачиваясь в микротрещины металла и соединяясь в молекулы, огромным давлением распирают стенки микротрещин и инициируют их рост. Происходит интенсивное охрупчивание металла и разрушение поверхности. Во влажном и холодном климате этот процесс интенсифицируется в несколько раз.

Изнашивание при действии водорода присутствует практически во всех узлах трения. Для мобильных машин наиболее характерными узлами являются подшипники коленчатого вала, трущиеся пары накладка – тормозной барабан (диск) и др.

Среди методов борьбы с отрицательным влиянием водорода на изнашивание можно назвать:

– исключение из состава пар трения пластмасс и смазок, склонных к выделению водорода;

– связывание водорода путём введения кремния и органических соединений, содержащих хлор;

– уменьшение температуры в рабочей зоне до 50–60°С;

– создание электрического потенциала деталей;

– выведение водорода из деталей их нагревом и выдержкой при температуре около 250°С.

Характеристики изнашивания

В трибологии используют следующие характеристики изнашивания:

– ***величина износа***, соответствующая одному из трех видов износов:

а) ***линейный*** – износ, определяемый изменением размера по нормали к поверхности трения и выражаемый в единицах длины;

б) ***объёмный*** – износ, определяемый изменением объёма трущихся деталей и выражаемый в единицах объёма;

в) ***массовый*** – износ, определяемый изменением массы трущейся детали и выражаемый в единицах массы;

– ***скорость изнашивания v***, определяемая выражением

$$v = \frac{h}{t}, \tag{4.18}$$

где h – износ; t – время работы сопряжения;

– ***интенсивность изнашивания*** I, определяемая отношением абсолютного износа к пути трения L:

$$I = \frac{h}{L}; \tag{4.19}$$

– ***износостойкость*** – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания;

– ***относительная износостойкость*** i, определяемая соотношением интенсивностей изнашивания исследуемого и эталонного сопряжений в одинаковых условиях трения:

$$i = \frac{I_{исслед}}{I_{эталон}}, \tag{4.20}$$

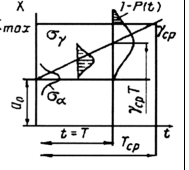
где $I_{эталон}$ относятся к паре, изготовленной из стали 45.

Основные зависимости для расчёта показателей изнашивания и связанных с ними показателей надёжности приведены в таблице 4.1.

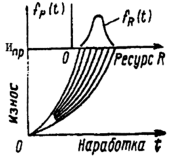
Таблица 4.1 – Основные зависимости для расчёта показателей изнашивания

Вид изнашивания и/или расчётная схема	Расчётная зависимость	Обозначения и применения
Наиболее общие закономерности по износу	$A_r = \text{const} N^n$, $W = \alpha\left(\frac{k}{3}\right)\left(\frac{N}{HB}\right)$, $I_h \approx i_h \frac{A_r}{A_a}$ $I_G = \frac{\Delta G}{L_{tp}}$, $I_V = \frac{\Delta V}{A_T L_{tp}}$ $I_h = \omega_0 / p_a$	A_r – фактическая площадь контакта; $n = 1$ при пластическом контакте и $n = 0{,}8$–$0{,}9$ при упругом; N – нагрузка; W – объём вещества, изношенного на единичном пути скольжения; α – коэффициент, при трении со смазкой, $\alpha < 1$; k – вероятность отделения частицы материала с пятника контакта $k = 10^{-2} \div 10^{-7}$; HB – твёрдость материала с пятника контакта $k = 10^{-2} \cdot 10^{-7}$; НВ – твердость материала; ω_0 – удельный объёмный износ; ΔV – изношенный объём; L – путь скольжения; i_h, I_G, I_V – интенсивность изнашивания соответственно удельная, по массе и объёмная; p_a – номинальное давление на контакте.
Для пар трения	$I_h = \frac{\Delta V}{A_T L_{TP}}$; $i = \sqrt{\frac{h}{R}\frac{P_H}{P_\phi}\frac{k_0}{h}}$ $I_h = \frac{\lambda}{\gamma}\frac{\Delta G}{A_T L_{TP}}$; $i = \frac{x}{n}\sqrt{\frac{h}{r}}$ $x = \frac{1}{2(\nu+1)}\sqrt{\frac{\nu}{2\alpha}}$ I = V/TL, I_ω = V/Mτφ, для поступательного и вращательного движения	A_T – площадь поперечного сечения; γ – плотность материала; $\lambda = A_a / A_T$ – отношение номинальной площади контакта к площади поверхности трения; Δh – условная изнашиваемая толщина слоя материала с пятен контакта; j – интенсивность изнашивания; h/R – отношение глубины внедрения единичной неровности к её радиусу; $P_н / P_ф$ – отношение номинального давления к фактическому; k_0 – постоянная, характеризующая распределение неровностей по высоте; n – число циклов до разрушения неровностей; i_h – удельное изнашивание; $\nu = 1 \div 3$ при упругом контакте и $x = 0{,}25 \div 0{,}21$, а для пластического – $x = 0{,}1$–$0{,}15$; $h / r = 10^{-3} \div 10^{-1}$. I_ω – энергетическая интенсивность изнашивания; T и M_T – сила и момент трения; L и φ – пути трения (например, пробег) и угол в радианах

Вид изнашивания и/или расчётная схема	Расчётная зависимость	Обозначения и применения
Модель энергетической интенсивности изнашивания	$L_n = [h]\left(\frac{i_1}{a_1}dL_1 + \frac{i_2}{a_2}dL_2 + ... + \frac{i_n}{a_n}dL_n\right)$	$[h]$ – суммарная толщина материала до полного износа, мм; $a_i (i = 1,2,..., n)$ – удельная работа сил трения в эксплуатации на 1 км пробега; j_i – износостойкость, полученная на стенде; dL_i – доля пробега транспортного средства в эксплуатации.
Износ конического сопряжения	$\gamma_{1-2} = \frac{P_n(K_1 + K_2)}{(R - r)\cos\alpha}$, где n через скорость относительного скольжения v : $n = v / 2\pi\rho = v / 2\pi y\cos\alpha$; $\rho = y\cos\alpha$ $h_{1-2} = (h_1 + h_2)/\cos\alpha$; $\gamma_{1-2} = (\gamma_1 + \gamma_2)/\cos\alpha$; $p = \frac{\gamma_{1-2}}{2\pi k}\frac{1}{y}$; $K = K_1 + K_2$; $P = 2\pi\int_{y_1}^{y_2} p\cos\alpha\rho dy$	γ_{1-2} – скорость абразивного изнашивания деталей; р – давление; P – сила; K_1 и K_2 – коэффициенты, характеризующие износостойкость деталей сопряжения; α – угол между нормалью к поверхности трения и направлением сближения деталей; γ_1, γ_2 – скорость изнашивания деталей в данной точке; h_{1-2} – относительное сближение изнашивающихся деталей (или сумма износов) в направлении $x - x$; $y_1 = r/\cos\alpha$; $y_2 = R\cos\alpha$; $\gamma_1 = K_1 p 2\pi\cos\alpha y$; $\gamma_2 = K_2 p 2\pi\cos\alpha y$;
Линейный износ по параметру (например размеру детали)	$X = kt$; $f(\gamma) = \frac{1}{\sigma_\tau\sqrt{2\pi}}\exp - \left(\frac{(\gamma_x - \gamma_{cp})^2}{2\sigma_\gamma^2}\right)$; $T = \varphi(\gamma) = \frac{X_{\max}}{\gamma_{cp}}; T_{cp} = \frac{X_{\max}}{\gamma_{cp}}$; $F(T) = \int_0^T f(T)dT; P(T) = 1 - F(t)$; $P(T) = 0,5 + \Phi\left(\frac{X_{\max} - \gamma_{cp}T}{\sigma_\gamma T}\right)$	X – размер детали (исследуемый параметр); $k = \gamma$ – скорость изнашивания (изменения) параметра; $f(\gamma)$ – плотность вероятности; γ_{cp} – среднее значение срока службы; σ_γ – среднее квадратическое отклонение скорости процесса изнашивания; T – срок службы; Ф[] – нормированная функция Лапласа, $0 \le \Phi \le 0,5; F(T)$ – вероятность отказа

Вид изнашивания и/или расчётная схема	Расчётная зависимость	Обозначения и применения
С учётом рассеивания начального размера в пределах поля допуска 	$X_{max} = a + \gamma t$; $T = (X_{max} + a)/\gamma$. Если аргументы a и γ распределены по нормальному закону, то $X_{cp} = a_0 + \gamma_{cp} T$.	Величина a – начальный параметр детали; σ_x – среднее квадратическое отклонение параметра X; а σ_a – то же, но начального размера (знак ± определяется расположением фактического размера детали по отношению к номинальному); а именно, математическое ожидание и дисперсия. Если γ_{cp} и σ_γ – постоянные величины, то последние члены в дроби для P(T) записываются как γ_{cp} T и $\sigma_\gamma^2 T^2$ соответственно.
Модель, при которой скорость изнашивания $\xi(t)$ стационарна, процесс накопления износа $\eta(t)$ обладает свойством сильного перемещения реализаций износа для однородных образцов, а τ(x) – случайный процесс – время τ достижения износа равно x	$E\{\eta(t)\} = at$ – математическое ожидание; $D\{\eta(t)\} = bt$ – дисперсия; $E\{\tau(x)\} = cx$; $D\{\tau(x)\} = gx$, $c = 1/a$; $g = ba^{-3}$; $P\{\tau \geq T\} = 1 - \Phi(\frac{T - cM}{\sqrt{gM}})$ – вероятность безотказной работы (без учёта малого влияния приработки). $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-i^2/2} du$	Величины *c, g, a, b* – постоянные коэффициенты, определяемые из характера процесса изнашивания; M – допустимый износ; T – контролируемая наработка (распределение величины $\eta(T)$ износа при больших T обычно является асимптотически нормальным). У процесса износа с сильным перемешиванием и стационарными приращениями дисперсия $D\{\eta(t)\}$ растет как t и $D\{\tau(M)\}$ пропорциональна M. Для детерминированного процесса $D\{\eta(t)\}$ растет как t^2, а $D\{\tau(M)\}$ пропорционально M^2 для «веерного» процесса. $F_\tau(T)$ – интегральная функция распределения вероятности безотказной работы τ

Вид изнашивания и/или расчётная схема	Расчётная зависимость	Обозначения и применения
Для случая, когда качество однотипных деталей различно либо когда значение износа при приработке сравнимо по величине с допустимым износом, а также когда при расчёте надёжности сопряжений по износу оценивается изменяющийся зазор.  	$F_r(T) \approx \Phi\left[\frac{T - cE\{M\}}{\sqrt{cD\{M\} + gE\{M\}}}\right]$; $R_{\Delta\eta}(t_1, t_2)$ – корреляционная функция, зависящая от разности $\Theta = \lvert t_j - t_i \rvert$; $R_{\Delta\eta}(t_i, t_j) = R_{\Delta\eta} = (\lvert t_j - t_i \rvert)$. Нормированный коэффициент корреляции: $r_{\Delta\eta}(\Theta) = \frac{R_{\Delta\eta}(\Theta)}{\sqrt{D\{\eta_i(\Delta t)\}}\sqrt{D\{\eta_j(\Delta t)\}}}$	$E\{M\}$ – математическое ожидание допустимой величины износа M, а $D\{M\}$ – ее дисперсия. Свойство сильного перемешивания процесса удовлетворительно отвечает зоне нормального износа, но нарушается, если речь идет о зоне приработки. Одновременно следует производить оценку поведения корреляционной функции $R_{\Delta\eta}(t_1, t_2)$ приращений износа. Стохастический процесс, когда связи между приращениями $\eta(t_1)$ и $\eta(t_2)$ убывают с ростом Θ, есть процесс с сильным перемешиванием.
Для зоны нормального развития износа (после приработки)	$F_s(T) = \Phi(T - cM - E\{\eta_r(t)\}]/$ $/cD\{\eta_r(t_r)\} + g[M - E\{\eta_r \times (t_r)\}]$; $P\{\tau(M) \geq T\} = P(T) = 1 - \Phi(_)$	$\eta_r(t_r)$ – износ, накопленный за период приработки; если $\eta_s(t_s)$ – износ, накопленный в зоне нормального износа, то $\eta_s(t_s) \leq M - \eta_r(t_r) = M^*$, где M^* – предельный уровень износа

Вид изнашивания и/или расчётная схема	Расчётная зависимость	Обозначения и применения
Модель детерминированного процесса изнашивания, когда перемешивания реализаций износа практически нет  	$U(t) = at^{\beta} + b; U(t) \approx at^{\beta}; R = (U_{ПР}/a)^{\frac{1}{\beta}}; R = \varphi(a)$ $m_R \approx \left(\frac{U_{ПР}}{m_a}\right)^{1/\beta}\left[1+\frac{(\beta+1)D_a}{2\beta^2 m^2{}_a}\right];$ $D_R \approx \frac{U_{ПР}^{2/\beta} D_a}{\beta^2 (m_a)^{2/\beta+2}}\left[1+\frac{(1+\beta)^2 D_a}{2\beta^2 m_a^2}\right];$ $m_R = \int_0^{\infty} R(a) f(a) d(a)$ – точное значение; $f_R(t) = f[a(R)]\left\lvert da/dR\right\rvert;$	$U(t)$ – износ; a, β – коэффициенты, зависящие от свойств материала деталей; b – износ детали по окончании приработки; R – ресурс; $U_{ПР}$ – предельный уровень износа; m_R, D_R – математическое ожидание и дисперсия ресурса; $f_R(t)$ – плотность вероятности распределения ресурса; $a(R)$ – функция, обратная $R(a)$; $a(R) = U_{ПР}/R^{\beta}; da/dR = -U_{ПР}\beta/R^{\beta+1}; f(a)$ – плотность вероятности распределения коэффициента $a; m_a, D_a$ – математическое ожидание и дисперсия величины a.
$U_{ПР} = И_{ПР}$	$D_R = \int_0^{\infty} [R(a)]^2 f(a) d(a) - m_R^2.$ $f(a) = \begin{cases} \frac{c}{s_a\sqrt{2\pi}} \exp\left[1+\frac{(a-m_a)^2}{2D_a}\right], \\ 0 < x < \infty; \\ 0, \text{если } x \le 0 \end{cases}$	Значение $c = \Phi\left(\frac{m_a}{s_a}\right)^{-1}$, причем функция нормального распределения табулирована; s_a – среднее квадратическое отклонение a; $P_R(t)$ – вероятность безотказной работы; $P_R(R_\gamma)$ – гамма-процентный ресурс

Вид изнашивания и/или расчётная схема	Расчётная зависимость	Обозначения и применения
Случай, когда величина a подчиняется по распределению усеченному нормальному закону	$F_R(t) = \int_0^t f_R(t)dt = \int_0^t \left[\frac{cU_{\text{ПР}}\beta}{R^{\beta+1}_{S_a}\sqrt{2\pi}} \right] \times e^{-(U_{\text{ПР}}/R^{\beta}-m_a)^2/2D_a dt};$ $P_R(t) = 1 - F_R(t) = (1-c) + c\Phi[(U_{\text{ПР}}/R^{\beta} - m_a)/s_a],$ если $c = 1$, т $P_R(t) \approx \Phi[(U_{\text{ПР}}/R^{\beta} - m_a)/s_a], P_R(R_\gamma) = \gamma/100$ $t_{cp} = U_0 h_{\text{ПР}},\ h = v_0 t = h_{\text{ПР}} t / t_{cp.}$	
Модель расчёта надежности с учётом потенциального отказа – изнашивания, когда характеристика процесса (например, старения) линейная	Для закона Вейбулла вероятность безотказной работы: $P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{a_t} \right)^{\theta} \right]$; $t_\gamma = t_{cp} / K_0$. $K_0 = \frac{K(b)}{\left(In\frac{100}{\gamma} \right)^{1/b}}$	t_{cp} – математическое ожидание наработки до предельного состояния; U_0 – математическое ожидание износостойкости; $h_{\text{ПР}}$ – предельное состояние детали по характеристике изнашивании h; v_0 – средняя скорость изнашивания; t – наработка; a_t, b – параметры масштаба и формы; требуемый запас надёжности, отвечающий γ-процентному ресурсу t_γ; K_0 – коэффициент, определяемый с учётом b

Вид изнашивания и/или расчётная схема	Расчётная зависимость	Обозначения и применения
При приближенном расчёте на стадии проектирования	$U_0 \approx \rho U_0' \frac{G' V_{пер}'}{G V_{пер}}$, $\rho = v_{о.и.}' / v_{о.п.}$	U_0' – средний износ изделия-прототипа; G, G' – давление сопряженных поверхностей деталей; $V_{пер}, V_{пер}'$ – соответствующая скорость относительного перемещения поверхностей контактирующих в работе деталей – новой и прототипа; ρ – коэффициент, учитывающий свойства материалов пар трения; $v_{о.и.}', v_{о.п.}$ – средние скорости износа пар трения сравниваемых вариантов.
Для нормального закона распределения, когда отказом является уход параметра (размера) за односторонний допуск	Плотность распределения наработки до отказа: $\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{ -\frac{[C - m(t)]^2}{2\sigma^2(t)} \right\} \left[\frac{C - m(t)}{\sigma(t)} \right]'$	$m(t)$ – математическое ожидание износа, т. е. уравнение износа детали, отвечающее среднему темпу изнашивания; $\sigma(t)$ – среднее квадратическое, или в данном случае уравнение, характеризующее рассеивание параметра в течение наработки; C – предельный допуск на износ.
Вероятностная модель для совместных и независимых событий	$L_p \approx [C] j_{ср} \sum [P(A_t) + P(B) - P(A_t)P(B)$	Здесь L_p – ожидаемый ресурс работы; $j_{ср}$ – средняя износостойкость; $P(A_t)$ и $P(B)$ – вероятность работы детали в различных условиях и режимах; C – предельный допуск на износ

Экспериментальные методы определения износа

Изучение процессов изнашивания деталей машин, работающих в реальных условиях эксплуатации, может осуществляться различными методами.

Метод микрометрирования основан на измерении при помощи микрометра или другого измерительного прибора с фиксацией размеров детали до начала, в процессе и после изнашивания. Недостатками метода являются неизбежная разборка и сборка изделия до и после работы с целью измерения детали, а также тот факт, что выявленное изменение размера может быть не только следствием изнашивания поверхности, но и результатом деформации детали. Кроме того, разборка и сборка изделий в процессе эксплуатации из-за отсутствия необходимых условий существенно снижает эксплуатационные качества машин и, следовательно, создает отличные по сравнению с заводской сборкой исходные условия, обусловливающие и различные скорости изнашивания.

Метод искусственных баз состоит в том, что на поверхности выдавливают или вырезают углубления заданной формы (пирамида или конус) и глубины. По изменению размера отпечатка, соотношение которого с глубиной заранее известно, определяется местный линейный износ. Используются специальные приборы, позволяющие определять износ с точностью от 1,5 до 2 мкм, для отверстий цилиндров двигателей, валов, а также плоских поверхностей. В большинстве случаев требуется предварительная разборка изделий.

Метод измерения массового или объёмного износа основан на взвешивании или измерении объёма детали до и после изнашивания. Обычно применяется при испытании деталей небольшой массы. Метод может оказаться неприемлемым, когда износ формируется не только вследствие отделения частиц, но и пластического деформирования.

Метод анализа содержания железа **в масле** основан на химическом анализе золы, получаемой сжиганием пробы масла. За период между двумя последовательными отборами проб учитывают общее количество масла в картере, его потерю и количество доливаемого масла. Данный анализ является интегральным, так как продукты износа обычно отделяются одновременно от нескольких трущихся деталей. Точное определение количества железа осложняется тем, что крупные частицы продуктов износа могут оседать на стенках картера.

Метод радиоактивных изотопов заключается в том, что в материал изучаемой детали вводят радиоактивный изотоп. При этом вместе с продуктами износа в масло будет попадать пропорциональное им количество атомов радиоактивного изотопа. По интенсивности их излучения в пробе масла можно судить о количестве металла, попавшего в масло за рассматриваемый период времени. Преимущества метода по сравнению с предыдущим: определяется износ определенной детали, а не суммарный для нескольких деталей; чувствительность повышается в сотни раз; ускоряется процесс исследования. Однако при использовании этого метода требуется специальная подготовка образцов исследуемых деталей, наличие специальной аппаратуры для измерения интенсивности излучения и принятие мер предосторожности для охраны здоровья людей.

Методы снижения интенсивности изнашивания

Среди методов снижения интенсивности изнашивания, присущих всем его видам, можно назвать уменьшение удельного давления на поверхности трения, равномерное распределение нагрузки по трущимся поверхностям, применение самосмазывающихся материалов, пластмасс, смазок с присадками, которые позволяют увеличить долговечность в 1,5–2,0 раза.

Скорость и интенсивность изнашивания можно существенно уменьшить, если принять необходимые меры, предотвращающие попадание в зону трения пыли и абразива.

В местах предполагаемого износа в некоторых случаях целесообразно предусматривать сменные износостойкие вставки или применять компенсаторы износа трущихся пар и устройства, позволяющие автоматически поддерживать оптимальный зазор.

В несколько раз можно уменьшить износ деталей, используя ***эффект безызносности***, состоящий в том, что на поверхности трения образуется тонкий разупрочнённый слой металла. Этот эффект, называемый ***избирательным переносом*****,** был обнаружен российскими учеными Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским при изучении трения медных сплавов о сталь в условиях граничной электропроводной смазки. В этих условиях образуется гальванический элемент медь-смазка-сталь, который приводит к образованию рыхлой медной размягченной массы (*сервовитный слой*), переносящейся силами молекулярного взаимодействия на более твердый материал – сталь. При

этом слой не уносится из зоны трения, и площадь фактического контакта возрастает более чем в 100 раз. Линейная интенсивность изнашивания существенно снижается вследствие уменьшения контактного давления в зоне трения.

Если при обычном трении смазочный материал рассматривается как защитный слой, то при избирательном переносе он выполняет роль разрыхляющей среды, превращающей верхние слои в квазижидкое состояние. Для создания условий избирательного переноса в узлах трения применяют химически активные смазочные материалы, обеспечивающие возникновение разрыхленных пленок, латунирование или меднение одного из элементов сопряжения; пластмассы с наполнителем Cu_2O для создания пары пластмасса – сталь и т. д.

В настоящее время в условиях избирательного переноса работают такие узлы трения машин, как тяжелонагруженные шарниры, болтовые соединения, ступицы колес, подшипники поворотных цапф ходовой части, передачи винт-гайка и другие ответственные сопряжения.

4.2. Коррозионные разрушения

Коррозией металлов называется их разрушение вследствие химического или электрохимического взаимодействия с коррозионной средой.

Из-за коррозии ежегодно безвозвратно теряется до 10% выплавляемого металла. На капитальные и текущие ремонты, вызванные коррозионными разрушениями, ежегодно расходуется свыше 10 млрд долларов. Кроме того, существенно снижается производительность машин и возрастают эксплуатационные расходы. Так, мощность двигателя внутреннего сгорания, зеркала цилиндров которого поражены коррозией, снижается на 20–25%, при этом расход масла увеличивается на 50–80%. В результате коррозионного воздействия предел выносливости конструкционных сталей снижается на 35–40%, износостойкость уменьшается от 1,5 до 4 раз.

Транспортные средства и технологические машины лесного, сельскохозяйственного, строительного и горнодобывающего комплексов, используемые в условиях запыленности, высокой влажности, перепадов температур, являются техническими объектами, подверженными интенсивным коррозионным разрушениям. При этом наиболее характерными элементами являются детали из тонколисто-

вой стали кузова, рамы и подвески, резьбовые и сварные соединения, детали топливной аппаратуры (выпускные клапаны, верхняя часть гильз цилиндров и днища поршней), газовые трубопроводы и др.

Все металлы термодинамически неустойчивы и стремятся вступить в реакцию с окружающей средой с образованием соединений, таких как окислы, карбонаты и др. Эти реакции сопряжены с перемещением электронов и называются электрохимическими. Склонность к отщеплению электронов меняется от металла к металлу, и чем она больше, тем более реакционноспособен металл.

Коррозия сопряжена с потерей электронов в среду (обычно вода с растворенным кислородом) и образованием продуктов коррозии, таких как окислы. Так как продукты коррозии обычно нерастворимы и могут образовывать защитную плёнку на металле, то скорость коррозии может оказаться не столь большой, как этого можно было ожидать на основании характеристик реакционной способности металла. С другой стороны, продукт коррозии стали является рыхлым и не связан прочно с металлом, а потому коррозия не прекращается.

Если два металла соединены друг с другом электрически на одном конце, а другие их два конца погружены в обычный электролит, то поток электронов будет направлен от более реакционноспособного металла к менее реакционноспособному. В таком сочетании, известном как гальванический элемент, оба металла называются электродами; тот из них, который теряет электроны, называется анодом, а приобретающий их – катодом.

Поскольку потеря электронов означает превращение металла в его соединения, то из этого следует, что анод корродирует и разрушается, тогда как катод остается неизменным.

Стадии процесса коррозии подробно показаны на рисунке 4.8.

Железо в анодной зоне теряет электроны. Эти электроны реагируют с водой и кислородом на катоде с образованием гидроксильных ионов. Гидроксильные ионы, образовавшиеся на катоде, вступают в реакцию с двухвалентными ионами железа, образовавшимися на аноде. Продуктом реакции является гидроокись двухвалентного железа. Далее в присутствии кислорода гидроокись железа окисляется с образованием гидратированной окиси железа, т. е. ржавчины. По мере накопления продуктов коррозии на аноде и катоде напряжение снижается. Потенциалы анода и катода сближаются, и скорость коррозии уменьшается.

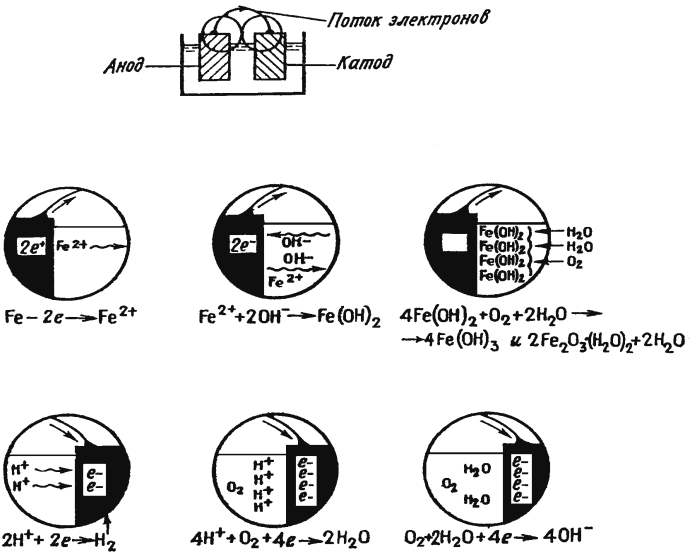


Рис. 4.8 – Схема процесса коррозии

Сталь в обычных условиях корродирует, даже не будучи присоединенной электрически к другому металлу, поскольку сталь неоднородна и содержит участки, несколько отличающиеся по составу. На границах кристаллитов существуют неодинаковые электрические потенциалы, и одни участки, являясь анодными по отношению к другим, корродируют и защищают последние, как и в случае с двумя различными металлами.

Для управления коррозионными процессами в случае гальванической пары, состоящей из различных металлов или сталей с различным химическим составом, определяющее значение имеют соотношения электродных потенциалов, составляющих гальваническую пару.

Если один электрод принимается за стандартный, и все другие металлы сравниваются с ним, то металлы могут быть расположены в порядке возрастания их электродных потенциалов, т. е. в так называемый ряд напряжений, или ряд потенциалов. На рисунке 4.9 представлены некоторые распространенные металлы, расположенные в порядке уменьшения их электродных потенциалов.

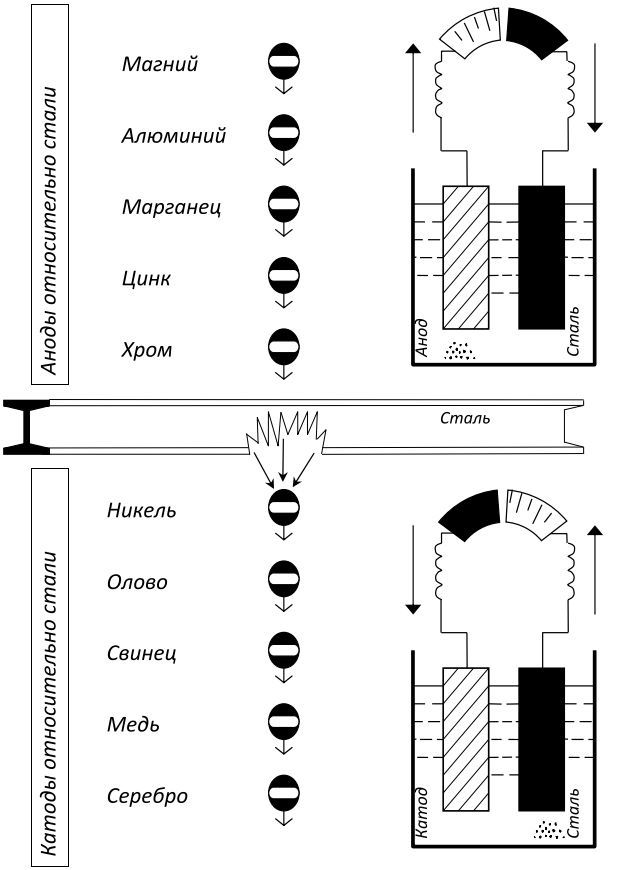


Рис. 4.9 – Ряд электродных потенциалов металлов

На коррозию металлов существенное влияние оказывает их химический состав и микроструктура. Для систем металл – вода (кислота, щелочь и др.) равновесные фазы представляются в виде диаграммы Пурбэ с координатами pH-E, показанные на рисунке 4.10.

Здесь E – электродвижущая сила; pH – характеристика кислотности или щелочности. Для водных растворов используется шкала pH от 0 до 14. Нейтральный раствор при $t^\circ = 25^\circ$C имеет pH = 7. Возрастание кислотности характеризуется изменением pH от 7 до 0, возрастание щелочности – изменением pH от 7 до 14.

На рисунке 4.10 поля диаграммы разделены на зоны, соответствующие коррозии, иммунитету (невозможности коррозии) и пассивности металлов (его неизменность в течение продолжительного времени).

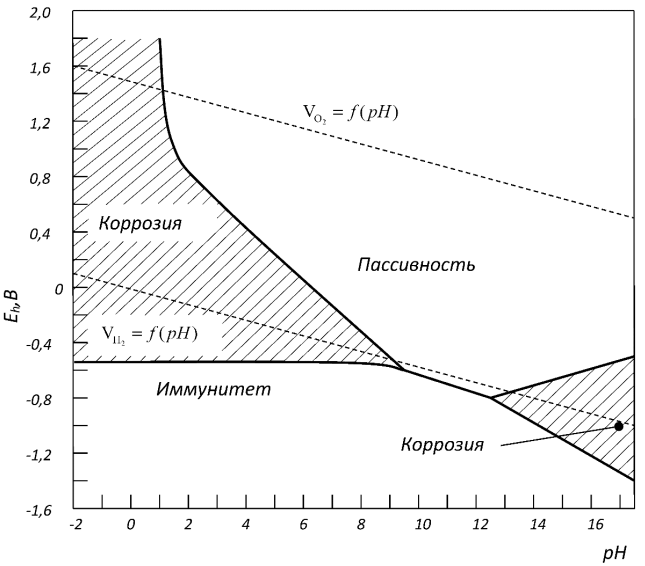
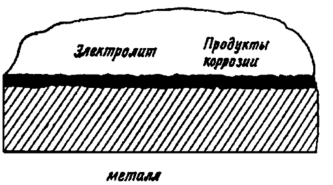
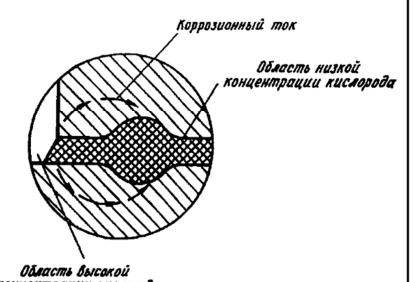


Рис. 4.10 – Диаграмма Пурбэ

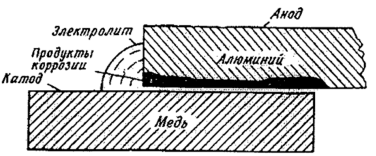
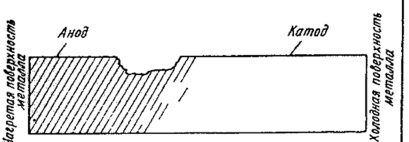
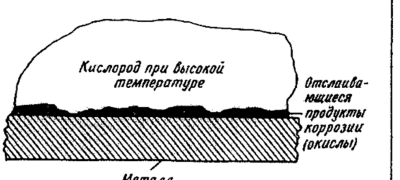
Скорость коррозии характеризуется проницаемостью в металл продуктов коррозии и измеряется в миллиметрах проницаемости за год (мм/год), микрометрах проницаемости за год (мкм/год), миллиграммах потери веса на квадратный дециметр за единицу времени (например, мг/дм^2·год).

Любой коррозионный процесс является химически сложным и, как правило, не соответствует тому простому случаю, когда один материал окисляется до полного состояния, а другой восстанавливается путём приобретения электронов. Более точной оказывается такая модель, которая учитывает поверхностные явления, вызывающие коррозионный процесс, в совокупности с индивидуальными особенностями коррозионных поражений. В нормативных документах коррозионные повреждения не классифицированы, поэтому предлагается воспользоваться классификацией, приведенной в таблице 4.2.

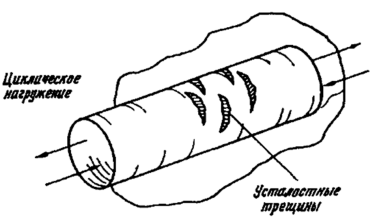
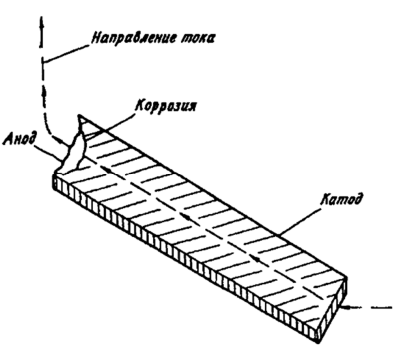
Таблица 4.2 – Классификация коррозионных процессов

Наименование и характеристика	Схема процесса
1	2
1. Общая коррозия. Отсутствие явно выраженных катодных и анодных участков. Равномер-ность поврежденного слоя. Продукты коррозии либо образуют защитный слой на металле, либо растворяются в коррозной среде.	
2. Межкристаллитная коррозия. Процесс развивается преимущественно по границам между зернами металла или сплава вследствие неупорядоченности расположения зерен и разности электродных потенциалов локальных объемных зон.	
3. Щелевая коррозия. Локализована и протекает в зазоре между двумя поверхностями. Концентрационные элементы возникают из-за различной концентрации ионов в отдельных зонах зазора. Металл переходит в раствор там, где концентрация ионов ниже.	

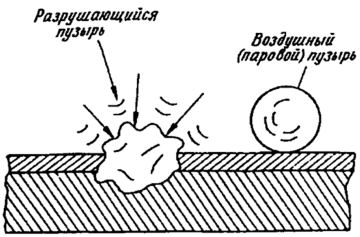
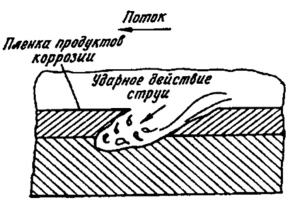
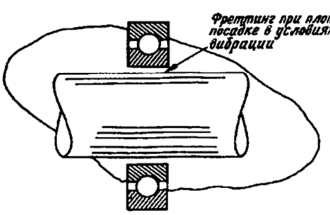
Продолжение табл. 4.2

1	2
4. Контактная коррозия. Возникает при контакте материалов с различными электродными потенциалами при наличии электролитной среды. Скорость коррозионного процесса пропорциональна величине гальванического тока. Потеря металла происходит на аноде, имеющем больший электродный потенциал.	
5. Термоконтактная коррозия. Причиной является возникновение гальванического элемента, создаваемого вследствие градиента температур различных локальных зон металла. Образуемые при этом катодные и анодные зоны инициируют локальные коррозионные повреждения.	
6. Высокотемпературная коррозия. Вызывается воздействием высоких температур в условиях контакта корродирующего материала с различными газами, солями и др. Скорость процесса зависит от температуры и времени выдержки. Коррозионный слой отслаивается и образуется вновь. К данному виду относятся сульфидная коррозия, науглероживание и обезуглероживание.	

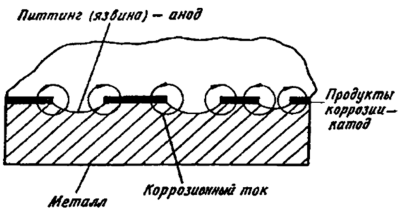
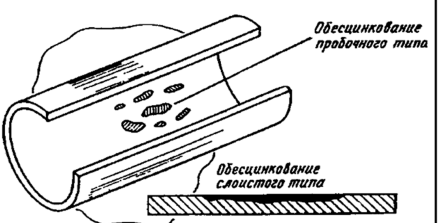
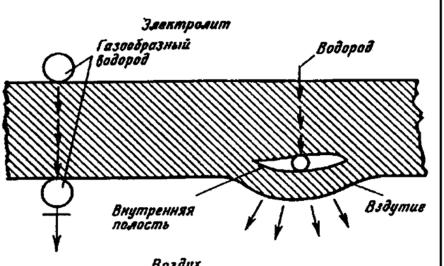
Продолжение табл. 4.2

1	2
7. Коррозионное растрескивание. Происходит при одновременном воздействии значительных растягивающих напряжений и коррозионной среды. Возникающие продукты коррозии увеличивают концентрацию напряжений, и при превышении предела текучести, в конечном итоге, происходит потеря прочности материала и его разрушение.	
8. Коррозионная усталость. Вызывается воздействием переменных нагрузок, в присутствии коррозионной среды. Протекает в форме растрескивания при воздействии механических напряжений, существенно меньших предела выносливости материала для некоррозионных условий.	
9. Коррозия блуждающими токами. Обусловлена протеканием неконтролируемых электрических токов по непредусмотренным путям через металлические конструкции, что вызывает развитие коррозионных повреждений электрически соединенных деталей и узлов конструкций.	

Продолжение табл. 4.2

1	2
10. Кавитационные повреждения. Возникают вследствие микровзрывов (захлопываний) газовых пузырей в турбулентных потоках жидкостей на поверхностях раздела с твердым телом. Вызывают разрушения защитных пленок, деформацию и разрушения (каверны) поверхности материала. Скорость процесса возрастает при наличии препятствия на пути потока, вибрации и др.	
11. Эрозионная коррозия. Коррозионный процесс при совместном действии с процессами изнашивания при быстром относительном перемещении коррозионной среды (газовой, жидкостной, высокотемпературного пара), содержащей абразивные частицы. Процесс периодический и состоит из чередующихся этапов разрушения и образования защитной пленки продуктов коррозии.	
12. Фреттинг-коррозия. Повреждения возникают в зоне контакта поверхностей при наличии фактора взаимного проскальзывания поверхностей с малыми амплитудами и высокими частотами. При этом происходит сварка микрообъемов с последующим разрушением этих зон, их изнашиванием и образованием новых зон.	

Продолжение табл. 4.2

1	2
13. Точечная коррозия (питтинг). Возникает при разрушении защитной пленки или слоев продуктов коррозии. По месту разрушения пленки образуется анод, а пленка (продукты коррозии) являются катодом. Образуется изъявления металла (питтинг), переходящее далее в процессы коррозионного растрескивания или коррозионной усталости.	
14. Селективная (избирательная) коррозия. Процесс перехода в раствор одного или нескольких металлов, составляющих сплав при воздействии растворителя, как правило, водной среды. Наиболее часто встречается обесцинкование, обезалюминивание и графитизация (разрушение в коррозионных средах чугуна с образованием пористого остатка графита).	
15. Водородная коррозия. Повреждение металлов и сплавов, обусловленные внесением в их структуру водорода или взаимодействия с ним. При высоких температурах водород вызвает обезуглероживание. Проникновение атомов водорода в металл происходит при сварке, травлении, обезжиривании и др.	

Среди транспортных и технологических мобильных машин микробиологической коррозии в большей степени подвержены амфибии, лесные и сельскохозяйственные машины.

Из совокупности коррозионных процессов, перечисленных в таблице 4.2, некоторые (например, кавитация, эрозия, фреттинг-коррозия) являются одновременно предметом изучения трибологии, поскольку процессы изнашивания, коррозии и усталости часто проявляются совместно.

При проектировании элементов конструкций, работающих в условиях преимущественного проявления контактной, щелевой и др. видов коррозии, зачастую решающее значение приобретает условие взаимной совместимости пар металлов и сплавов (табл. 4.3), основанное на их физико-химических свойствах.

Таблица 4.3 – Совместимые (+) и несовместимые (–) пары металлов и сплавов

№ п/п	Металлы и сплавы	Пары металла													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Алюминий и его сплавы	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–
2	Магний и его сплавы	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	Цинк и его сплавы	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+	–	–
4	Кадмий	+	–	+	+	–	–	+	+	+	–	+	+	–	–
5	Никель	–	–	+	–	+	+	–	–	–	–	+	+	–	–
6	Олово	–	–	+	+	–	–	+	+	+	–	+	+	–	–
7	Хром	–	–	+	–	+	+	–	–	–	–	+	+	–	–
8	Свинец	–	–	+	+	–	–	+	+	+	–	+	+	–	–
9	Сплавы свинца с оловом	–	–	+	+	–	–	+	+	+	–	–	–	–	–
10	Медь и её сплавы	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	+
11	Сталь нелегированная	+	–	+	+	+	+	+	+	–	–	+	+	–	–
12	Сталь легированная	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+	–	–
13	Сталь нержавеющая	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–
14	Серебро	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	+

Анализ данных, приведенных в таблице 4.3, позволяет сделать очень важный вывод: не всегда применение дорогостоящих металлов или сплавов позволяет получить желаемый результат в борьбе с коррозией; гораздо более важным моментом при проектировании является правильный выбор совместно работающих металлов или сплавов.

Интенсивность коррозионных процессов

Интенсивность коррозионного разрушения материалов зависит от большого количества различных по своей природе и значимости факторов. Модель коррозионного процесса условно можно представить в виде функции

$$V_к = \varphi(K, T, Э), \tag{4.21}$$

где $V_к$ – скорость корродирования поверхности; K – конструктивные факторы, влияющие на коррозионный процесс; T – технологические факторы; $Э$ – эксплуатационные факторы.

Определить возможность протекания коррозии как любого химического или электрохимического процесса можно по изменению изобарно-изотермического потенциала (энергии Гиббса), который определяется по формуле (4.22). Если G_1 есть энергия Гиббса исходных веществ, а G_2 – энергия Гиббса продуктов реакции, то изменение энергии системы составит:

$$\Delta G = G_2 - G_1. \tag{4.22}$$

Самопроизвольно протекают лишь те процессы, в результате которых происходит уменьшение энергии Гиббса, т. е. $\Delta G_1 > G_2$ или $G < 0$.

Термодинамический расчёт позволяет определить возможность или невозможность протекания коррозии. Прикладным приложением такого расчёта в первом приближении является диаграмма Пурбэ, изображенная на рисунке 4.10.

Однако ни термодинамический расчёт, ни использование диаграммы Пурбэ не позволяют определить скорость коррозионного процесса. Реальная скорость коррозии определяется многими факторами: состоянием поверхности металла и особенностями его структуры, температурой, составом и скоростью движения коррозионной среды, механическими напряжениями и т. д. Поэтому нет абсолютных показателей коррозионной стойкости. Существуют лишь сравнительные данные, отвечающие определенным условиям коррозии.

Поскольку коррозионный процесс имеет гетерогенный характер, его скорость определяется протеканием следующих основных стадий:

– подведением к поверхности металла коррозионно-активных частиц (ионов, молекул), осуществляемым диффузией или конвекцией. По закону Фика скорость диффузии (количество вещества, перенесенное в единицу времени) определяется из уравнения

$$Vi = k_{\partial} S \frac{dc}{dx}, \tag{4.23}$$

где k_{∂} – коэффициент диффузии; S – площадь сечения; dc/dx – градиент концентрации;

– реакцией частиц с металлом, протекающей во многих случаях многостадийно;

– отведением продуктов коррозии от поверхности металла, осуществляемым в соответствии с законом диффузии.

Скорость коррозии определяется в соответствии с уравнением

$$V\hat{e} = k_p C \cdot exp\left[-\frac{W}{RT}\right], \tag{4.24}$$

где k_p – константа скорости реакции; C – концентрация частиц; W – энергия активации, представляющая собой тот избыток энергии по сравнению со средней, обладание которым делает частицу реакционно-активной; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; $exp\left[-\frac{W}{RT}\right]$ – член уравнения, характеризующий долю частиц, обладающих необходимой энергией активации, т. е. долю активных частиц.

Из уравнения (4.24) следует, что скорость реакции выше при низкой энергии активации и она возрастает с увеличением концентрации и температуры.

Продукты коррозии во многих случаях играют решающую роль в торможении коррозионного процесса, например, при образовании на поверхности металлов соответствующих пленок, тормозящих проникновение коррозионно-активных частиц.

По механизму протекания коррозионного процесса различают ***химическую*** и ***электрохимическую*** коррозии.

Химическая коррозия металлов есть взаимодействие металла с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают

одновременно. В качестве примера коррозии такого типа можно указать на коррозию металлов в сухих газах и неэлектролитах. При химической коррозии продукты коррозии образуются непосредственно на частях поверхностей металлов, участвующих в реакции.

Газовая коррозия часто встречается в технологических процессах, например, коррозия металлов при термообработке, коррозия деталей нагревательных печей и т. д.

Большое влияние на скорость газовой коррозии оказывают температура и состав газовой среды.

Зависимость газовой коррозии от температуры приближенно описывается уравнением Аррениуса:

$$\ln V_k = A - \frac{B}{T}, \qquad (4.25)$$

где V_k – скорость реакции; A и B – константы; T – абсолютная температура, °К.

Скорость атмосферной (общей) коррозии, которой подвержены кабины, рамы и кузова мобильных машин и их детали, открытые действию атмосферных осадков, зависит в основном от температуры, влажности и загрязненности воздуха. Зависимость скорости коррозии от влажности окружающего воздуха представлена на рисунке 4.11, на котором коррозия условно подразделяется на сухую (*1*), влажную (*2*) и мокрую (*3*). Скорость коррозии на участке (3) уменьшается вследствие снижения концентрации электролита.

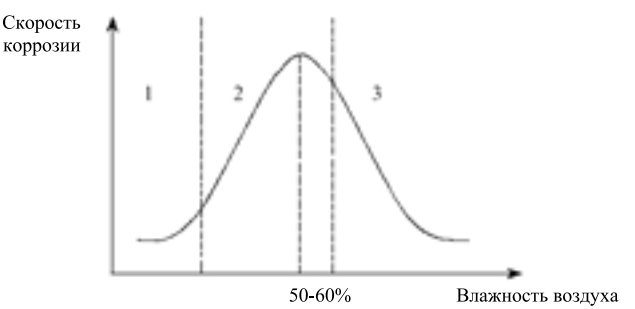


Рис. 4.11 – Зависимость скорости атмосферной (общей) коррозии от относительной влажности воздуха

Общая закономерность накопления коррозионных повреждений в условиях атмосферной общей коррозии выражается зависимостью

$$Z = a\,(1 - e^{-V_K t}), \qquad (4.26)$$

где Z – толщина слоя материала, поврежденного коррозией; a – начальная толщина элемента конструкции; $V_к$ – скорость окислительной реакции, т. е. глубина коррозионного разрушения металла в единицу времени; t – продолжительность воздействия внешней среды.

Данные о скоростях коррозионных процессов для различных металов, приведенные в таблице 4.4, относятся к химически чистым элементам и могут быть использованы только для сравнительного анализа. Реальные скорости различных коррозионных процессов могут быть вычислены по зависимостям, полученным расчётно-экспериментальным путём с использованием эмпирических зависимостей. При этом среди учитываемых факторов, влияющих на скорости коррозионных процессов, наряду с фактором совместимости (см. табл. 4.3), важнейшим является фактор коррозионной среды (табл. 4.5).

Таблица 4.4 – Средние величины скорости проникновения коррозии в металлы

Металл	Pb	Al	Sn	Cu	Ni	Zn	Fe
$V_к$, мкм/год	4	8	12	12	32	50	200

Таблица 4.5 – Среды, повышающие скорости коррозионных процессов в материалах

Материал	Среда
Алюминиевые сплавы	Вода и пар; содержащие NaCl морская атмосфера и морская вода; воздух, водяной пар
Медные сплавы	Тропическая атмосфера; ртуть; $HgNO_3$; бромиды; аммиак; органические аминосоединения
Алюминиевая бронза	Вода и пар; H_2SO_4; щелочи
Аустенитные нержавеющие стали	Хлориды, включая $FeCl_2$ $FeCl_3$, NaCl; морские вода и атмосфера; H_2SO_4; фториды; конденсат пара, полученного испарением хлоридсодержащей воды; H_2S
Ферритные нержавеющие стали	Хлориды, включая NaCl; фториды; бромиды; йодиды; щелочи; нитраты; вода; пар

Продолжение табл. 4.5

Материал	Среда
Углеродистые и низколегированные, стали	HCl; щелочи; нитраты; HNO_3; HCN; расплавленный цинк и сплавы Na-Pb; H_2S; H_2SO_4-HNO_3; H_2SO_4; морская вода
Высокопрочные легированные стали (при напряжениях выше предела текучести)	Морская вода и атмосфера, загрязненная отходами промышленности
Магний	Содержащие NaCl морская вода и морская атмосфера; вода и пар; щелочи; N_2O_4
Свинец	Растворы уксуснокислого свинца
Никель	Бромиды; щелочи; H_2SO_4
Титан	Морская вода и морская атмосфера; среды, содержащие NaCl при температуре от 288°C; ртуть; расплавленный кадмий; AgCl и серебро, растворы галогенидов в метиловом спирте; азотная кислота; N_2O_4; хлор- и фторпроизводные углеводородов

Методы борьбы с коррозионными повреждениями

Разработка программы борьбы с коррозией является сложной технико-экономической проблемой, решаемой методами многокритериальной оптимизации. Основные учитываемые факторы перечислены ниже.

Применяемые материалы. Оценке подлежат стойкость к коррозии в конкретной окружающей среде, склонность к отдельным формам коррозионных процессов, применимость технологий антикоррозионной обработки и оптимальных способов соединений, обрабатываемость с целью придания оптимальной формы.

Совместимость применяемых материалов. Устранение близости друг к другу разнородных несовместимых материалов, способных в локальной зоне, в границах системы или изделия в целом повышать скорость коррозионных процессов.

Формы деталей, сборочных единиц и изделия. Выбор таких форм, которые позволяют без приложения чрезмерных усилий содержать их в чистоте, снижая тем самым скорость коррозионных процессов на всех этапах жизненного цикла изделия.

Механические нагрузки. Мониторинг текущей несущей способности деталей и узлов с тем, чтобы не создавать критических нагрузок и вынужденно не снижать их в результате больших коррозионных повреждений.

Поверхности деталей. Обеспечение для изделия оптимальных значений чистоты обработки поверхностей, оптимальных показателей обтекаемости, исключающих высокую турбулентность абразивно-электролитических потоков, поддержания электрохимического равновесия между поверхностями и средой.

Защита поверхностей. Разработка комплекса мероприятий по изоляции поверхностей деталей от окружающей среды, анодной и катодной защиты, снижения химической и электрохимической активности самой коррозионной среды.

Режим эксплуатации. Назначение периодичности и разработка технологии повторных антикоррозионных операций обслуживания, разработка технологий восстановления деталей при критических коррозионных повреждениях.

Экономический фактор. Назначение приемлемого перечня и глубины антикоррозионных мероприятий, дающего оптимальное соотношение показателей надёжности изделия и стоимости его жизненного цикла.

Перечисленные разделы программы борьбы с коррозией являются общими для всех видов коррозионных повреждений. В то же время физико-химическая специфика конкретных видов коррозии обуславливает индивидуальный подход при разработке частных антикоррозионных мероприятий, которые приведены ниже для повреждений, перечисленных в последовательности, соответствующей принятой в таблице 4.2.

***– Общая коррозия*:**

а) применение коррозионностойких материалов;

б) изменение коррозионной среды или введение в нее ингибиторов;

в) нанесение защитных покрытий;

г) анодная защита корродирующих поверхностей.

***– Межкристаллитная коррозия*:**

а) подбор материалов с гомогенной кристаллической структурой;

б) применение улучшающих режимов термообработки (например, высокотемпературного гомогенизирующего отжига);

в) избегать применения сварки и режимов термообработки, нарушающих гомогенность структуры материала.

***– Щелевая коррозия*:**

а) уменьшение зазоров между элементами конструкции до предельно допустимого минимума;

б) обеспечение дренажа электролита, образующегося в щелях;

в) применение уплотнительных водонепроницаемых материалов;

г) нанесение защитных покрытий на детали по обе стороны щели;

д) применение нахлесточных сварных швов взамен заклепочных и болтовых соединений;

е) запаивание и зачеканивание щелей;

ж) применение ингибиторов коррозии в зазорах и застойных полостях конструкций.

***– Контактная коррозия*:**

а) применение пар материалов с минимальной разностью электродных потенциалов;

б) создание возможности замены анодных деталей при ремонтах;

в) при вынужденном использовании в контакте разнородных материалов соединять последние сваркой или пайкой;

г) нанесение высокоадгезионных непористых покрытий на катодные поверхности;

д) использование катодной защиты;

е) ингибирование коррозионной среды;

ж) избегать применения несовместимых химических веществ для пропитки и покрытия контактирующих материалов.

***– Термоконтактная коррозия*:**

а) создание условий для равномерного нагрева или охлаждения деталей;

б) предотвращение ситуации одновременного воздействия на детали жидкостей и газов с существенно различными температурами;

в) обеспечение сплошности антикоррозионных и изоляционных покрытии.

***– Высокотемпературная коррозия*:**

а) применение коррозионностойких материалов;

б) назначение при проектировании оптимальных рабочих сред и температур;

в) максимальное использование возможностей сокращения продолжительности контактов деталей с агрессивными средами.

***– Коррозионное растрескивание*:**

а) применение металлов и сплавов с повышенной вязкостью разрушения;

б) увеличение запаса прочности в зонах действия растягивающих напряжений;
в) снижение концентрации напряжений в зонах растяжения;
г) применение стыковых и угловых сварных соединений с тщательной разделкой зон перед сваркой и последующей отделкой сварных швов;
д) применение технологий сварки, термической и механической обработки, создающих минимальные уровни остаточных напряжений растяжения;
е) создание остаточных напряжений сжатия путём наклепа поверхностей;
ж) металлизация и нанесение гальванических покрытий, пассивирование и нанесение покрытий на основе синтетических смол горячей сушки;
з) исключение режимов эксплуатации с периодическим повторением смачивания и осушения поверхностей;
и) ингибирование коррозионной среды;
к) создание катодной защиты.

***– Коррозионная усталость*:**

а) мероприятия, перечисленные в п. «Коррозионное растрескивание»;
б) максимально возможное снижение амплитуд периодических нагрузок;
в) демпфирование биений и вибраций конструктивных элементов;
г) изменение частот собственных колебаний деталей и узлов для предотвращения резонансных явлений.

***– Коррозия блуждающими токами*:**

а) изоляция токопроводящего электрооборудования от элементов конструкций;
б) заземление электрооборудования;
в) отведение блуждающих токов специальными проводниками;
г) применение катодной защиты;
д) применение неэлектропроводных сред вокруг защищаемых деталей и узлов;
е) электрическое соединение защищаемых элементов с точкой заземления;
ж) устранение источников блуждающих токов.

***– Кавитационные повреждения*:**

а) сведение к минимуму разности гидродинамических давлений на смежных участках трубопроводов;

б) демпфирование источников вибрации;
в) сведение к минимуму количества участков с резким изменением поперечного сечения и резкими изменениями направлений движения жидкости;
г) снижение возможности доступа воздуха к жидкостным потокам;
д) обеспечение высокого качества внутренних поверхностей трубопроводов;
е) выбор материалов, самоупрочняющихся наклепом, возникающим в результате микровзрывов газовых пузырей;
ж) использование катодной защиты;
з) нанесение на внутренние поверхности облицовки или эластичных покрытий.

– *Эрозионная коррозия*:

а) применение материалов с высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью;
б) обеспечение форм поверхностей, создающих условия для их ламинарного обтекания;
в) сведение к минимуму резких изменений направления обтекающего потока;
г) увеличение толщины деталей в уязвимых местах;
д) установка в уязвимых местах заменяемых накладок;
е) установка фильтров и водяных ловушек для улавливания абразивно-коррозионных потоков;
ж) нанесение потоков с высокой абразивно-коррозионной стойкостью;
з) использование катодной защиты.

– *Фреттинг-коррозия*:

а) демпфирование вибраций в зоне коррозионного контакта;
б) создание условий граничного или жидкостного трения в зоне контакта;
в) увеличение контактных напряжений (не выше допустимых) для снижения локального проскальзывания и вибраций;
г) применение материалов с высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью;
д) использование в контактирующих парах совместимых материалов;
е) изоляция контактирующих поверхностей от кислорода;
ж) удаление из зоны контакта продуктов изнашивания и коррозии;

– *Точечная коррозия*:

а) применение материалов с высокой контактной прочностью и образующих высокопрочные окисные плёнки;

б) создание высокопрочных защитных покрытий;
в) контроль химического состава коррозионной среды, введение ингибиторов.

– Селективная (избирательная) коррозия:

а) применение коррозионностойких сплавов с высокой степенью связи между компонентами;
б) снижение активности коррозионной среды, введение ингибиторов;
в) применение катодной защиты.

– Водородная коррозия:

а) использование устойчивых монометаллических или плакированных материалов;
б) поддержание чистоты поверхности, использование масел с моющими присадками;
в) использование технологии металлизации поверхностей водородостойкими металлами;
г) использование сварочных электродов с низким содержанием водорода в обмазке;
д) строгое соблюдение технологий термообработки, травления и нанесения металлопокрытий;
е) контроль химического состава среды – применение ингибиторов, устранение сульфидов, цианитов, фосфоросодержащих ионов;
ж) создание и контроль потенциала катодной защиты;
з) удаление водорода горячей сушкой металла (100–150°С);
и) нанесение резиновых и пластиковых защитных покрытий.

***– Микробиологическая коррозия*:**

а) выявление в среде конкретных видов микроорганизмов, вызывающих коррозию;
б) удаление из среды веществ, используемых микроорганизмами для питания;
в) введение в среду гербицидов и ингибиторов коррозии;
г) использование соответствующих стойких материалов и защитных покрытий;
д) применение катодной защиты;
е) периодическая очистка корродирующих поверхностей.

Учитывая, что в реальных условиях эксплуатации коррозионные повреждающие процессы протекают в различных комбинациях, необходимо применение антикоррозионных мероприятий в соответствующих сочетаниях.

4.3. Усталость

В настоящее время практически во всех отраслях мирового машиностроения доминирует принцип обеспечения ограниченного ресурса деталей, работающих в условиях периодического нагружения, с установленной вероятностью неразрушения, т. е. обеспечение необходимой и экономически целесообразной долговечности.

Многообразие видов машин не позволяет в рамках одной книги предложить полные, доведенные до прикладного уровня рекомендации по обеспечению безотказности и долговечности их базовых агрегатов по критерию сопротивления усталости. Однако известная универсальность методов оценки показателей надёжности машин по критерию усталости дает возможность использовать результаты исследований, проведенных применительно к конкретному классу машин, для других машин аналогичного назначения.

Физико-механические основы усталости

К усталостным относят повреждения и последующие разрушения, возникающие в результате воздействия переменных нагрузок. Сопротивление материалов действию нагрузок, изменяющихся во времени по величине и знаку или только по величине, существенно отличается от сопротивления действию статической или квазистатической нагрузки. Под действием переменных нагрузок конструктивные элементы разрушаются при значительно меньших напряжениях, чем под действием статических нагрузок, при этом детали разрушаются без заметных остаточных деформаций даже в случаях высоких показателей пластичности материалов, из которых они изготовлены. Способность материалов сопротивляться разрушению при воздействии переменных нагрузок называется ***выносливостью материала***.

Изучение вопросов накопления усталостных повреждений в теории надёжности машин имеет чрезвычайно важное значение. Детали, решающим образом влияющие как на показатели безопасности людей, так и на показатели безотказности и долговечности самих машин, выходят из строя главным образом вследствие разрушений усталостного характера. Это оси и валы, рессоры и пружины, детали несущих систем, кривошипно-шатунных механизмов двигателей и многие другие.

Вопрос о механизме накопления усталостных повреждений металлов при периодических нагружениях представляется весьма сложным, несмотря на то что в этой области проведено большое количество теоретических и экспериментальных исследований.

В основу одной из моделей накопления усталостных повреждений положена постепенная потеря способности кристаллических зерен металлов и сплавов сопротивляться сдвигу. Деформация материала связана с искажением его кристаллической решетки и изменением межатомных расстояний. При воздействии достаточно больших нагрузок и возникновении соответствующих напряжений в кристаллических зернах материалов, обладающих свойствами пластичности, по некоторым плоскостям, называемым ***плоскостями скольжения***, происходят необратимые сдвиги. Группы атомов, смещённые относительно друг друга, уже не образуют единой атомной решетки, а получившиеся при этом новые образования внутри себя оказываются более прочными, а на своих границах – разупрочненными (разрыхленными). Это проявляется в образованиях в зонах разрыхления ***микротрещин*****,** которые, соединяясь, являются очагами магистральной усталостной трещины. Её развитие и приводит в конечном итоге к усталостному разрушению.

Профессор В. С. Иванова предлагает разделить процесс усталости металлов на три периода: 1 – инкубационный период, 2 – период зарождения и развития субмикроскопических трещин до микроскопических размеров и 3 – период развития микротрещины до макротрещины критического размера.

Обобщая многие современные теоретические представления и экспериментальные данные, можно отметить, что процессы зарождения и развития усталостных повреждений обусловлены явлениями генерирования, перемещения и накопления подвижных дефектов Δ в теле при его циклическом деформировании. Энергия U (тепловая и механическая) и реальная наработка (число циклов n нагружения) являются двигателем этих явлений и процессов. Поскольку в металле имеются различного рода врожденные и генерируемые нагрузкой (деформацией) подвижные дефекты, то и явления накопления усталостного повреждения могут быть связаны с тем или иным типом дефекта. Поэтому можно говорить о различных механизмах усталости: дислокационном, вакансионном, термофлуктуационном.

Рассмотрим подробнее дислокационный механизм усталости. Под воздействием циклических напряжений (деформаций) сдвига $\tau(\gamma)$

имеющиеся в теле дислокации страгиваются и начинают перемещаться, а некоторые области металла генерируют свежие дислокации. При этом движении дислокации не могут преодолевать любые препятствия. Если в поликристаллическом металле непреодолимым препятствием оказывается, например, поверхность раздела соседних зерен, дислокации образуют у этой границы плоское скопление. Количество дислокаций в плоском скоплении тем больше, чем больше расстояние их свободного перемещения; последнее обычно соответствует радиусу зерна. Плоское скопление дислокаций формирует полосу скольжения, которая и может стать источником первичных ***субмикротрещин.***

На рисунке 4.12 показан один и тот же участок никеля на разных этапах усталостного испытания. После 10^4 циклов появляются первоначально тонкие полосы скольжения. С ростом числа n циклов их количество становится всё больше, а некоторые из первоначальных полос заметно расширяются.

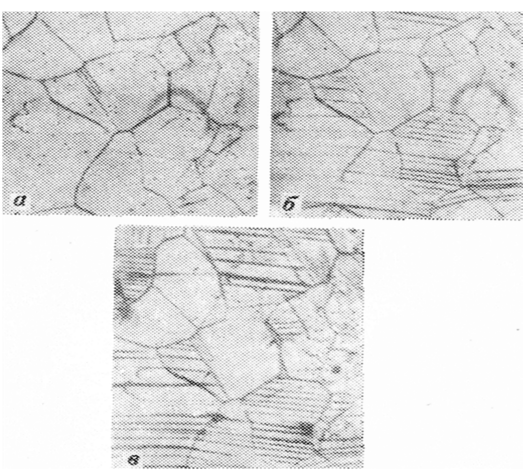


Рис. 4.12 – Чистый никель на различных стадиях испытания на усталость (×330):
а – $n = 10^4$ циклов; *б* – $n = 5\times10^4$; *в* – $n = 2{,}7\times10^5$ циклов.

Со временем полосы скольжения трансформируются в ***пачки скольжения***. Пачки скольжения в конструкционных сталях, пронизанные первичными усталостными субмикротрещинами, видны на

рисунке 4.13*а*, *б*. Исследованию подвергали образцы стали 45, испытанные в условиях знакопеременного плоского изгиба при напряжениях, равных среднему значению предела выносливости. Пачки скольжения могут образовываться по разным кристаллографическим направлениям, но всегда можно установить направление легкого скольжения, в котором сопротивление сдвигу наименьшее; пачки скольжения по таким направлениям более развиты.

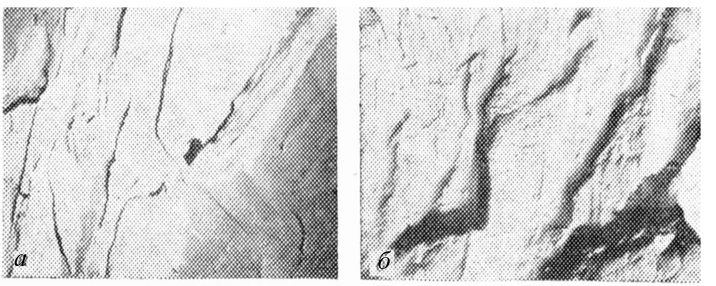


Рис. 4.13 – Пачки скольжения в стали 45 (×6000)

Если пачка скольжения встречается с поверхностью образца, то из пластически деформированных объёмов тела вдоль плоскости циклического скольжения выдавливаются тонкие лепестки металла толщиной менее 1 мкм. Это явление экструзии, которое представляет собой, по существу, процесс локального микроразрушения. Экструзии обычно соседствуют с интрузиями – микроканавками, вытянутыми вдоль плоскости скольжения и чередующимися с лепестками выдавленного металла (рис. 4.14).

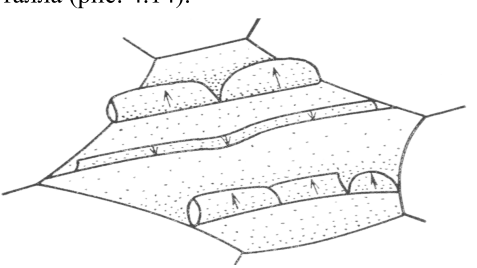


Рис. 4.14 – Экструзии и интрузии на поверхности образца, образовавшиеся в процессе усталостных испытаний

Таким образом, в зернах циклически деформируемого тела возникает очень большое количество полос и пачек скольжения, значительная часть которых становится источником субмикротрещин. Кинетическое взаимодействие и развитие последних под действием циклических касательных напряжений и приводит к возникновению многочисленных усталостных микротрещин, т. е. рассеянного повреждения.

Множественные микротрещины разделяются на два типа: микротрещины, не приводящие каждая в отдельности к окончательному разрушению, и микротрещины, перерастающие в магистральную трещину, приводящую тело к разрушению. В процессе усталости растет как число рассеянных микротрещин, так и их средняя длина. Со временем концентрация таких трещин достигает некоторой критической величины первого порядка и образуются множественные микротрещины следующего порядка. Затем этот процесс повторяется до тех пор, пока плотность рассеянных в деформируемом объёме множественных микротрещин не достигнет предельной концентрации, тогда и происходит возникновение и развитие магистральной трещины. Существует концентрационный критерий разрушения твердых тел, в соответствии с которым к моменту разрушения между среднестатистическим размером $d_т$ множественных трещин и средним расстоянием между ними $C^{-1/3}$ существует следующая связь: $C^{-1/3} = e\, d_т$, где e – основание натуральных логарифмов.

Е. Екобори установил, что в металлических материалах чем выше уровень статической прочности, тем чаще зонами зарождения магистральной усталостной трещины становятся неметаллические включения, чем материал мягче, тем чаще такими зонами оказываются границы матричной структуры. В материалах с очень высокой твердостью (хрупкое состояние) окончательное разрушение может происходить и от единственной трещины. В материале с надрезом преимущественно развивается только трещина, зародившаяся на дне надреза.

Развитие магистральной усталостной трещины приводит в конечном итоге к усталостному разрушению.

В рамках другой гипотезы И. А. Одинг и В. С. Иванова полагают, что в отдельных микрообъёмах материала вследствие взаимных процессов перемещения плоскостей скольжения температура повышается до значений, превышающих точку плавления. Расплавленные

микрообъёмы материала, продвигаясь и соединяясь, образуют последовательно микро- и макротрещины.

Изложенные гипотезы накопления усталостных повреждений в ряду прочих получили наибольшую степень признания.

Усталостные разрушения имеют ряд характерных признаков, позволяющих отличить их от других видов разрушений. На поверхности излома можно различить пять характерных зон (рис. 4.15).

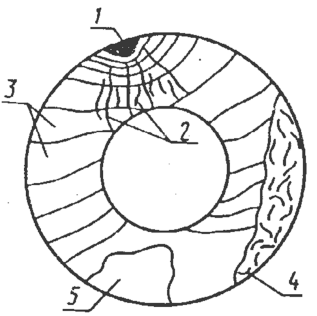


Рис. 4.15 – Схема усталостного излома детали:
1 – фокус излома и очаг разрушения; *2* – вторичные ступеньки и рубцы; *3* – усталостные линии; *4* – зона ускоренного развития трещин; *5* – зона долома.

Фокус излома – малая локальная зона, лежащая в области начала развития макроскопической трещины усталости. Фокус излома располагается, как правило, в местах поверхностных дефектов и других концентраторов напряжений. При наличии в детали внутренних дефектов, а также вследствие её поверхностного упрочнения фокус излома может располагаться внутри детали.

Очаг разрушения – зона, непосредственно прилегающая к фокусу излома. На поверхности разрушения может быть несколько очагов разрушения. Они имеют наибольшие блеск и поверхностную чистоту.

Участок избирательного развития трещины характерен наличием характерных усталостных линий, волнообразно расходящихся от очага разрушения. Здесь могут образовываться очаги трещин, развивающихся в другом направлении (пасынковые трещины). От их слияния образуются вторичные ступеньки и рубцы.

Участок ускоренного развития трещины, являясь переходной зоной между участком избирательного развития и зоной долома, образуется в течение нескольких последних циклов, предшествующих окончательному разрушению.

Зона долома имеет характерный вид хрупкого разрушения с крупнозернистой структурой.

Описанные зоны наглядно представлены на рисунке 4.16.

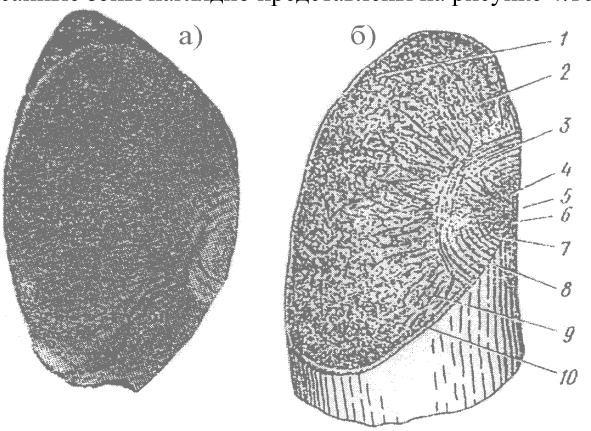
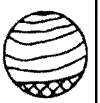
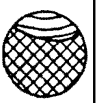
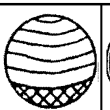
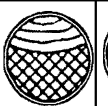
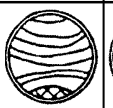
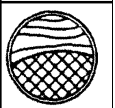
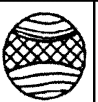
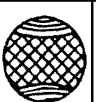
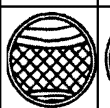
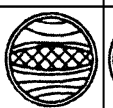
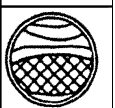
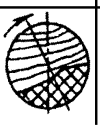
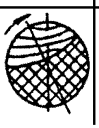
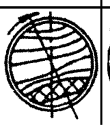
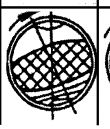
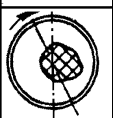


Рис. 4.16 – Фрактография (*а*) и схема (*б*)
усталостного излома пружины:
1 – зона долома; *2* – участок ускоренного развития; *3* – участок избирательного развития; *4* – очаг излома; *5* – фокус излома; *6* – ступеньки и рубцы; *7* – пасынковые трещины; 8 – усталостные линии; *9* – рубцы; *10* – скос.

Общий вид картины разрушения в значительной степени определяется характером нагружения детали, величиной нагрузки и наличием концентраторов напряжений. Схематично эта зависимость представлена в таблице 4.6.

Опасность трещины заключается в том, что она при определенных условиях нагружения и длине, превышающей критическую, обуславливает возможность внезапного хрупкого разрушения. Остаточный ресурс конструкции с трещиной определяется, прежде всего, скоростью её развития и величиной критической трещины.

Таблица 4.6 – Виды усталостных изломов (зоны долома заштрихованы накрест)

вид нагрузки	Нет концентрации напряжений		Умеренная концентрация напряжений		Высокая концентрация напряжений	
	Напряжение					
	низкое	*высокое*	*низкое*	*высокое*	*низкое*	*высокое*
Односторонний изгиб						
Двусторонний изгиб						
изгиб с кручением						

С образованием трещины у её вершины происходит концентрация напряжений, которая увеличивается по мере роста трещины. Для характеристики этого явления Ирвин предложил использовать ***параметр интенсивности напряжений K***, отражающий совместное влияние на напряженное состояние у вершины трещины приложенных нагрузок и длины трещины. С физической точки зрения K отражает перераспределение напряжений в теле вследствие образования трещины и характеризует величину усилий, передающихся через область у вершины трещины.

Для бесконечной широкой пластины с центральной сквозной трещиной при работе на растяжение параметр растяжения определяется по формуле

$$K=\sigma\sqrt{\pi l}\,, \tag{4.27}$$

где σ – нормальное растягивающее напряжение; l – линейный размер трещины.

При конечной ширине пластины для учёта зависимости K от размера пластины получено соотношение (4.28), содержащее поправку на конечную ширину пластины

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} F(\lambda), \qquad (4.28)$$

где $F(\lambda)$ – коэффициент, учитывающий влияние граничных условий на напряженное состояние у вершины трещины.

Он характеризует отличие напряженного состояния у краев трещины в теле конечных размеров от напряженного состояния у краев такой же трещины в не ограниченной по ширине пластине и вычисляется приближенно либо определяется экспериментально.

Процесс роста трещины описывается через текущее значение коэффициента интенсивности напряжений K. При достижении коэффициентом K предельного значения, называемого ***вязкостью разрушения*** K_C, наступает неустойчивость состояния, и трещина совершает скачок. Существует три вида трещин: нормального отрыва, поперечного сдвига и продольного сдвига, которые представлены на рисунке 4.17. Первая из них возникает, когда образец разрывают, прикладывая растягивающие усилия к двум противоположным сторонам. Второй тип разрушения возникает в том случае, когда склепанные между собой листы материала пытаются разделить по плоскости соединения, срезая заклепки. Дефект в заклепке и будет трещиной сдвига. Трещина продольного сдвига образуется в том случае, когда материал не разрывают, а режут.

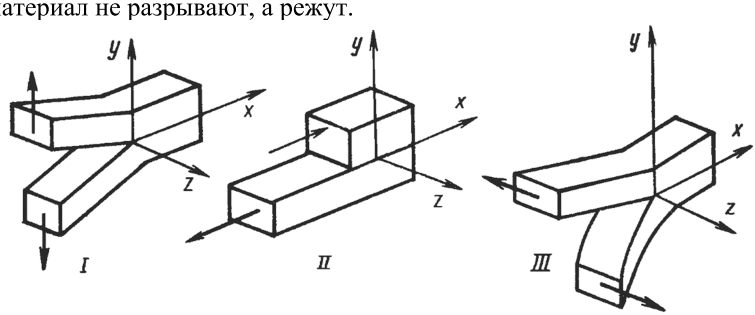


Рис. 4.17 – Виды раскрытия трещин:
I – трещина нормального отрыва; *II* – трещина поперечного сдвига;
III – трещина продольного сдвига.

Наиболее часто анализируются разрушения, полученные путём нормального отрыва. В этих случаях, когда растягивающие напряжения перпендикулярны к плоскости трещины, критический коэффициент интенсивности напряжений обозначается K_{IC}. K_{IC} принят за пока-

затель стойкости материала против хрупкого разрушения и характеризует сопротивление материала продвижению в нем трещины при отрыве.

Характеристики сопротивления усталости

При анализе показателей сопротивления материалов действию переменных напряжений предполагается, что нормальные и касательные напряжения представляют собой периодические функции $p = f(t)$ с периодом T. При этом в реальных условиях нагружения конструктивные элементы машин в основном подвержены действию случайных нагрузок, однако с целью сравнительного анализа и стандартизации характеристик сопротивления усталости случайные нагрузки заменяются периодическими, равными им по повреждающему воздействию. Для этого используются ***методы схематизации*** случайных нагрузок, основные из которых будут рассмотрены ниже.

Рассмотрение количественных характеристик периодического нагружения сводится к анализу ***цикла напряжений*** – совокупности всех значений напряжений за время одного периода. Анализ характеристик для различных циклов нагружения приведен в таблице 4.7.

Основными характеристиками цикла являются:

– максимальное напряжение $p_{макс}$;

– минимальное напряжение $p_{мин}$;

– среднее напряжение $p_c = \frac{p_{макс} + p_{мин}}{2}$;

– амплитуда $p_a = \frac{p_{макс} - p_{мин}}{2}$;

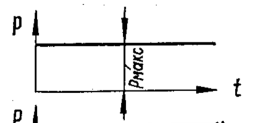
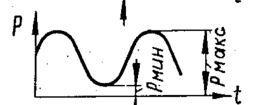
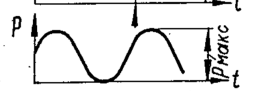
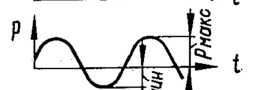
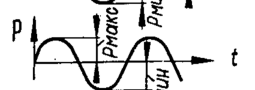
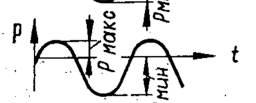
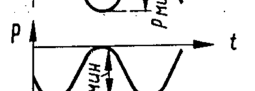
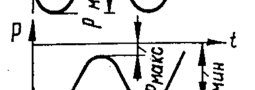
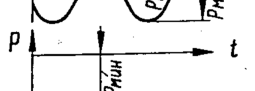
– размах $2p_a = p_{макс} - p_{мин}$;

– коэффициент асимметрии цикла $r = \frac{p_{мин}}{p_{макс}}$.

В частных случаях действия нормальных (растяжение – сжатие или изгиб) или касательных (сдвиг, кручение) напряжений в принятых обозначениях буква p заменяется соответственно на σ или τ с сохранением соответствующих индексов

Зависимость между выбранными значениями напряжений цикла и долговечностью объекта испытаний называется ***кривой усталости*** (в некоторых литературных источниках – ***кривая Вёлера***).

Таблица 4.7 – Характеристики периодического нагружения

Вид цикла	$p_{макс}$, $p_{мин}$	$p_c = \frac{p_{макс} + p_{мин}}{2}$, $p_a = \frac{p_{макс} - p_{мин}}{2}$	$r = \frac{p_{мин}}{p_{макс}}$
	$p_{макс} = p_{мин} > 0$	$p_c = p_{макс} = p_{мин} > 0$ $p_a = 0$	$r = +1$
	$p_{макс} > 0$ $p_{мин} > 0$	$p_c > 0$ $p_a \neq 0$	$0 < r < +1$
	$p_{макс} > 0$ $p_{мин} = 0$	$p_c = 1/2 p_{макс}$ $p_a = 1/2 p_{макс}$	$r = 0$
	$p_{макс} > 0$ $p_{мин} < 0$	$p_c > 0$ $p_a \neq 0$	$-1 < r < 0$
	$p_{макс} = -p_{мин} > 0$ $p_{мин} < 0$	$p_c = 0$ $p_a = p_{макс}$	$r = -1$
	$p_{макс} > 0, p_{мин} < 0$ $p_{макс} < \lvert p_{мин} \rvert$	$p_c < 0$ $p_a \neq 0$	$-\infty < r < -1$
	$p_{макс} = 0$ $p_{мин} < 0$	$p_c = 1/2 p_{мин}$ $p_a = 1/2 \lvert p_{мин} \rvert$	$r = \pm\infty$
	$p_{макс} < 0$ $p_{мин} < 0$	$p_c < 0$ $p_a \neq 0$	$+1 < r < +\infty$
	$p_{макс} = p_{мин} < 0$	$p_c = p_{макс} = p_{мин} < 0$ $p_a = 0$	$r = +1$

Общий вид полной кривой усталости представлен на рисунке 4.18.

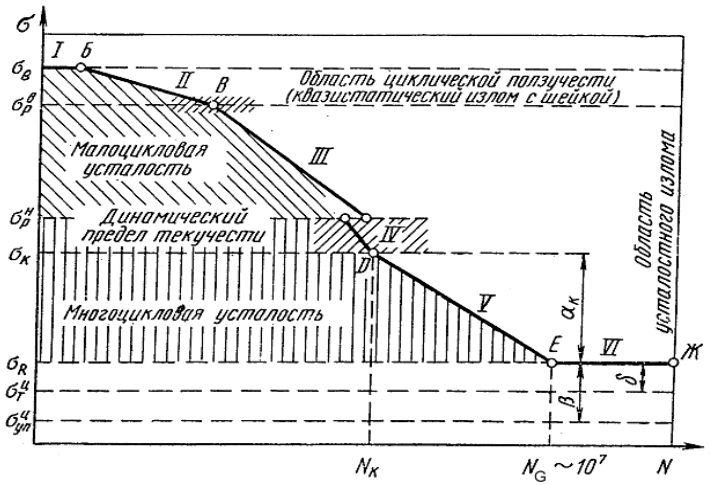


Рис. 4.18 – Полная кривая усталости:

$\sigma_в$ – временное сопротивление разрыву; $\sigma_р^в$ – напряжение верхнего разрыва; $\sigma_р^н$ – напряжение нижнего разрыва; $\sigma_к$ – критическое напряжение; σ_R – предел выносливости; $\sigma_т^ц$ – циклический предел текучести; $\sigma_{уп}^ц$ – циклический предел упругости; $N_К$ – критическое число циклов; N_G – число циклов до точки перегиба левой ветви кривой усталости; $\alpha_к$ и β – константы.

Такой вид кривой усталости характерен для черных металлов и титана и имеет шесть явно выраженных участков:

I – область статического разрушения;

II – область циклической ползучести;

III – область малоцикловой усталости;

IV – область динамического предела текучести;

V – область многоцикловой усталости;

VI – область «неразрушающих» напряжений.

Наличие перегибов и разрывов левой ветви кривой усталости объясняется следующими причинами: изменением напряженного состояния перед вершиной трещины; переходом от разрушения по границам зерен к разрушению по зерну при изменении уровня действу-

ющих напряжений; неравномерностью распределения деформаций по сечению образца и другими физико-механическими факторами.

Каждая из выделенных зон, охватываемых кривой усталости, имеет существенно различную физическую природу. Отметим, что области динамического предела текучести, малоцикловой усталости и циклической ползучести не представляют значительного интереса применительно к конструктивным элементам большинства машин, поскольку эти элементы работают в названных областях в основном в период долома.

Кривая усталости в многоцикловой области (рис. 4.19) полностью описывается тремя характеристиками, называемыми ***характеристиками сопротивления усталости:*** *пределом выносливости* σ_r (r – асимметрия цикла нагружения); *числом циклов до точки перелома левой ветви кривой усталости* N_G (применительно к N_G иногда употребляют термин – *базовое число циклов*); *параметром* m, характеризующим угол наклона левой ветви кривой усталости, построенной в двойных логарифмических координатах:

$$m = ctg\,\alpha\,. \tag{4.29}$$

В обозначении σ_r при известном или заданном значении коэффициента асимметрии цикла r вместо буквенного символа в индексе σ_r проставляется цифровой: например, предел выносливости для симметричного цикла (r = –1) записывается σ_{-1}, для пульсирующего ($r = 0$) – σ_0 и т. д.

Наибольшую известность получило уравнение левой ветви кривой усталости для растяжения сжатия и изгиба в записи

$$\sigma_i^m \cdot N_i = \sigma_r^m \cdot N_G, \tag{4.30}$$

или применительно к кручению и сдвигу:

$$\tau_i^m \cdot N_i = \tau_r^m \cdot N_G\,, \tag{4.31}$$

где σ_i и τ_i – текущие значения соответственно нормальных и касательных напряжений; σ_r, τ_r, N_G и m – характеристики сопротивления усталости.

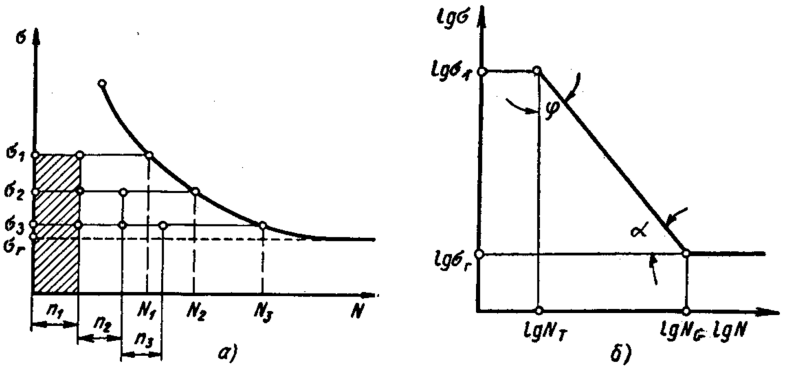


Рис. 4.19 – Кривая усталости в многоцикловой области:
а – в простых координатах со схемой суммирования усталостных повреждений; *б* – в двойных логарифмических координатах.

Практическое построение кривой усталости и определение характеристик сопротивления усталости различных материалов производится путём испытаний на усталость образцов круглого и прямоугольного профилей, показанных на рисунке 4.20.

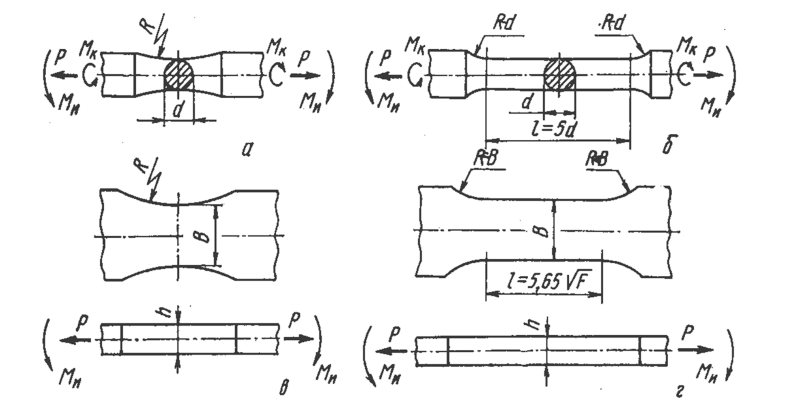


Рис. 4.20 – Образцы с круглой (*а, б*) и прямоугольной (*в, г*) рабочими частями

Размеры образцов стандартизированы и приведены в таблице 4.8. Поверхность образцов должна быть обработана по 9–10-му классу чистоты и не иметь следов коррозии, окалины, цветов побежалости и других дефектовочных признаков.

При определении характеристик сопротивления усталости используются многообразцовые, малообразцовые и косвенные методы.

При использовании ***многообразцового метода*** испытания групп образцов проводятся не менее чем на четырёх уровнях напряжений. По полученным в результате испытаний частным реализациям $N_i(\sigma_i)$ строится левая ветвь кривой усталости с использованием метода наименьших квадратов.

Таблица 4.8 – Размеры рабочих частей образцов (рассматривать совместно с рис. 4.20).

d	R	$l=5d$	R	h	$в$	$l=5{,}65\sqrt{в \cdot h}$
Тип *а*			**Тип *в***			
5,0	5,0	–	20	<3	10	–
7,5	7,5	–	10	3÷5	<5	–
10	10	–	20	5	10	–
12	12	–	30	7,5	15	–
			40	10	20	–
Тип *б*			**Тип *г***			
5,0	5,0	25	10	<3	10h	17,9
7,5	7,5	37,5	5	3÷5	5h	12,6
10	10	50	10	5	10	40
12	12	60	15	7,5	15	60
			20	10	20	80

Минимально необходимое количество образцов для испытаний определяется по формуле

$$n = \frac{\upsilon^2}{\Delta_p^2} \cdot Z_{1-0,5}^2 \cdot \varphi(p), \qquad (4.32)$$

где υ – коэффициент вариации предела выносливости; Z – квантиль нормального распределения нормированной случайной величины; $\varphi(p)$ – функция, зависящая от вероятности, для которой определяется предел выносливости.

В зависимости от требуемой точности оценки характеристик сопротивления усталости n может изменяться от десятков до сотен образцов. В практике транспортного машиностроения испытаниям обычно подвергают не менее 10–15 образцов из деформируемых сплавов и не менее 15 из литейных.

Среди ***малообразцовых методов*** определения характеристик сопротивления усталости наиболее известными являются методы Локати, Одинга – Вейбулла, Бойцова, Эномото. Всего известно около 20 малообразцовых методов.

Их принцип с различными вариациями состоит в сокращении количества испытываемых образцов путём испытаний каждого образца при возрастающей в процессе испытаний амплитуде напряжений и последующей экстраполяции результатов испытаний.

Общим недостатком этих методов является их невысокая точность и применимость только к испытаниям материалов. Кроме того, большинство этих методов (кроме методов Локати, Бойцова и Одинга – Вейбулла) дают информацию только по значению предела выносливости, т. е. могут быть применены только для материалов, работающих в зоне неограниченной выносливости (неразрушающих напряжений).

Косвенные методы направлены на установление взаимосвязи между пределом выносливости и другими физико-механическими показателями материалов: пределом текучести, временным сопротивлением разрыву, твердостью поверхности и др.

В первом приближении считают, что для сталей предел выносливости при изгибе составляет около 50% от предела прочности:

$$\sigma_{-1} \approx (0,4 \div 0,5)\sigma_{вр}. \qquad (4.33)$$

Для высокопрочных сталей принимают:

$$\sigma_{-1} \approx 400 + \frac{1}{6}\sigma_{вр}\,(\text{МПа}). \qquad (4.34)$$

Для цветных металлов характерно более широкое рассеивание:

$$\sigma_{-1} \approx (0,25 \div 0,5)\sigma_{вр}. \qquad (4.35)$$

Для случая кручения конструкционных сталей:

$$\tau_{-1} \approx 0,6\sigma_{-1}. \qquad (4.36)$$

При кручении хрупких сталей, сплавов и чугунных деталей:

$$\tau_{-1} \approx 0,8\sigma_{-1}. \qquad (4.37)$$

Данные о количественной взаимосвязи между характеристиками, фигурирующими в формулах (4.33)–(4.37), для некоторых распространенных материалов приведены в таблице 4.9.

Точность косвенных методов ещё ниже, чем у малообразцовых, и также остаются вне рассмотрения характеристики N_G и m. Как и в предыдущем случае, областью применения косвенных методов является область неограниченной выносливости.

Таблица 4.9 – К определению пределов выносливости косвенными методами

Материал	σ_T, МПа	σ_{BP}, МПа	σ_{-1}, МПа (изгиб)	τ_{-1}, МПа
Сталь малоуглеродистая	180	320–420*	160–220	80–120
Сталь 30 незакаленная	280	480–600	200–270	110–140
Сталь 45 незакаленная	340	600–750	250–340	150–200
Сталь 30ХГСА закаленная	1500	1700	700	400
Чугун серый	–	210	100	80
Алюминиевый сплав АМЦ (термообработанный)	35–176	100–190	49–70	–
Органическое стекло	–	75	20	25

* Имеющийся разброс данных объясняется вариациями характеристик материалов и технологических режимов (плавки, прокатки, термообработки и др.).

Таким образом, для определения характеристик сопротивления усталости наиболее приемлемым остается многообразцовый метод с построением кривой усталости в многоцикловой области и определением всех характеристик – σ_r, N_G и m. Это необходимо ввиду того, что конструктивные элементы многих машин проектируются с ограниченной долговечностью. Кроме того, неточность в определении σ_r, связанная с применением малообразцовых и косвенных методов всего на 15–5%, приводит к ошибке в оценке долговечности в 2,5–5 раз. Следствием этого является существенное увеличение металлоемкости конструкции либо снижение показателей безотказности и долговечности.

Большинство конструктивных элементов машин в своих рабочих нагрузках имеют статическую составляющую суммарных напряжений. Например, для рам, рессор, осей вагонов или автомобилей это составляющая веса груза и собственной массы. Естественно, что пределы выносливости как материалов, так и конкретных конструктивных элементов с изменением коэффициента асимметрии цикла будут соответственно изменяться. Чтобы охарактеризовать эти изменения, строят ***диаграмму предельных напряжений*** (***диаграмму Смита***), на которой по оси абсцисс откладывают среднее напряжение цикла σ_c, а по оси ординат – наибольшее $\sigma_{макс}$ и наименьшее $\sigma_{мин}$ напряжения цикла (рис. 4.21). Их предельные значения $\sigma_{r\,макс}$ и $\sigma_{r\,мин}$ определяются путём испытаний построением семейства кривых усталости при конкретных характеристиках цикла.

Нанося на диаграмму точки M_i и соответствующие им N_i, абсциссы которых σ_{ri} , а ординаты – соответственно $\sigma_{r\,макс}$ и $\sigma_{r\,мин}$, и, соединяя эти точки, получим искомые зависимости и $\sigma_{r\,макс}(\sigma_c)$ и $\sigma_{r\,мин}(\sigma_c)$. Очевидно, что точка $Д$, в которой $\sigma_{r\,макс} = \sigma_{r\,мин}$, а $r = 1$, соответствует случаю максимальной статической нагрузки – пределу прочности материала.

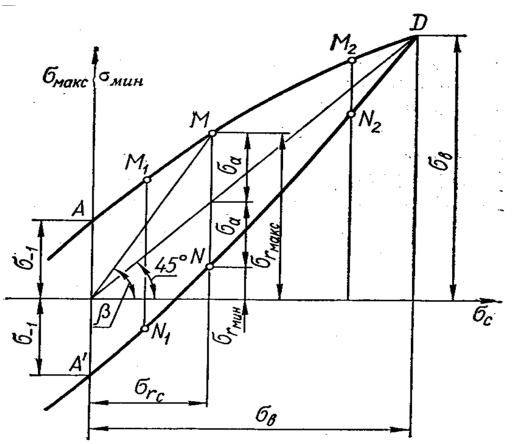


Рис. 4.21 – Диаграмма предельных напряжений

Лучи, проходящие через начало координат диаграммы предельных напряжений, являются геометрическим местом точек, характери-

зующих циклы с одинаковым коэффициентом асимметрии r. При этом используем формулу

$$tg\beta = \frac{\sigma_{макс}}{\sigma_{мин}} = \frac{2\sigma_{макс}}{\sigma_{макс} + \sigma_{мин}} = \frac{2}{1+r}. \qquad (4.38)$$

Более удобным и наглядным представлением диаграммы Смита (рис. 4.14) является зависимость $\sigma_{ra} = f(\sigma_m)$, представленная на рисунке 4.22. Здесь σ_{ra} – амплитудные значения предела выносливости при асимметричном цикле нагружения; σ_m – среднее напряжение цикла.

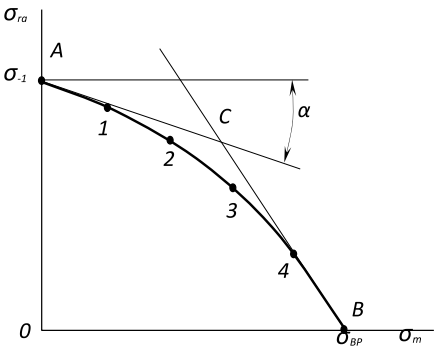


Рис. 4.22 – Диаграмма предельных амплитуд $\sigma_{ra} = f(\sigma_m)$

На рисунке 4.22 точка А соответствует симметричному циклу нагружения, а точка В – пределу прочности.

С достаточной точностью зависимость $\sigma_{ra} = f(\sigma_m)$ описывается линейным уравнением

$$\sigma_{ra} = \sigma_{-1} - (1 - \psi_\sigma)\cdot\sigma_m, \qquad (4.39)$$

где ψ_σ – коэффициент, характеризующий чувствительность материала к асимметрии нагружения.

Графически (рис. 4.22) ψ_σ может быть представлен в виде $\psi_\sigma = \mathrm{tg}\alpha$, а аналитически представлен формулой

$$\psi_\sigma = 1 - \frac{2(\sigma_{r_2}/\sigma_{r_1} - 1)}{(\sigma_{r_2}/\sigma_{r_1})\cdot(1+r_2) - (1+r_1)}. \qquad (4.40)$$

В результате многочисленных исследований установлено, что для углеродистых сталей $\psi_\sigma = 0{,}1 \div 0{,}2$, для легированных $\psi_\sigma = 0{,}2 \div 0{,}3$

при действии нормальных напряжений. Испытания образцов из тех же сталей на кручение дают существенно меньшие значения коэффициента: $\psi_\tau = 0{,}05 \div 0{,}1$ и $\psi_\tau = 0{,}1 \div 0{,}15$ соответственно. Одновременно установлено, что значения коэффициента асимметрии цикла не влияют на характеристики N_G и m.

При схематизации кривая $\sigma_{ra}(\sigma_m)$ в первом приближении может быть заменена ломаной линией ACB.

Отметим общие закономерности, характеризующие влияние асимметрии нагружения:

– с увеличением коэффициента асимметрии повышаются предельные напряжения цикла или пределы выносливости. Соответственно снижаются амплитудные значения пределов выносливости;

– при повышенных температурах влияние асимметрии цикла усиливается;

– при коррозионной усталости увеличение статической составляющей может приводить к более сильному влиянию явления коррозионного растрескивания под напряжением. Увеличение асимметрии цикла r и связанной с ним предельной амплитуды σ_a будет приводить к меньшему влиянию среды на снижение усталостной прочности;

– при наличии концентраторов напряжений с увеличением r чувствительность материала к концентрации напряжений падает;

– с увеличением r скорость роста усталостных трещин снижается, причем максимальные её значения относятся к симметричному циклу. Амплитудные значения напряжений оказывают на скорость роста трещин значительно большее влияние, чем средние, однако при одинаковых амплитудных напряжениях возрастание средних их значений приводит к увеличению скорости роста трещин.

Все зависимости и данные, приведенные в настоящем разделе применительно к оценке характеристик сопротивления усталости, до сих пор относились к *материалам*, из которых изготавливаются детали машин. Пределы выносливости реальных деталей $\sigma_{-1д}$ могут быть в 2–6 раз ниже σ_{-1} – того же показателя материала. Такое снижение предела выносливости обусловлено влиянием следующих факторов:

– концентрации напряжений;

– абсолютных размеров детали (масштабный фактор);

– качества обработки поверхности;

– технологических методов поверхностного упрочнения деталей (наклеп, закалка, цементация, комбинированные методы);

– эксплуатационных факторов (высокие и низкие температуры, коррозия, радиация и др.);

– чередования нагрузочных режимов (влияние перегрузок, пауз, тренировок и др.).

Коэффициент, учитывающий суммарное влияние перечисленных факторов, рассчитывается по формуле

$$K_{\sigma_Д} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1Д}} \qquad (4.41)$$

и показывает, во сколько раз снижается предел выносливости детали в сравнении с пределом выносливости материала, из которого она изготовлена.

Рассмотрим поочередно степень влияния каждого фактора на снижение пределов выносливости деталей.

Концентрация напряжений. Этот фактор вызывает местное увеличение напряжений по сравнению с номинальными напряжениями в местах резких изменений сечений, резких изменений очертаний детали (у отверстий, резьб, канавок, галтелей и др.).

На рисунке 4.23 показан частный пример действия концентратора напряжения на общую картину нагруженности в локальной зоне, содержащей концентратор, для случая растяжения.

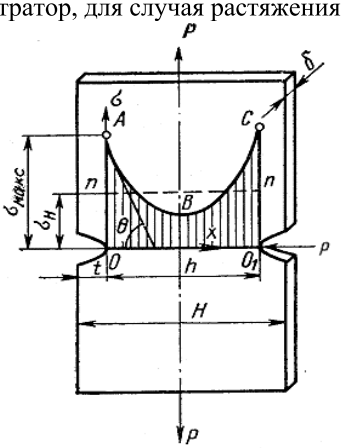


Рис. 4.23 – Концентрация напряжений в пластине с боковыми надрезами: $\sigma_н = P/H\delta$ – номинальное напряжение; p – радиус закругления вершины выреза; n–n – эпюра номинальных напряжений; ABC – действительная эпюра напряжений.

Превышение действительных напряжений над номинальными оценивают ***теоретическим коэффициентом концентрации напряжений*** для упругих деформаций, который рассчитывается по формуле

$$\alpha_\sigma = \sigma_{макс} / \sigma_н. \qquad (4.42)$$

Теоретический коэффициент α_σ, оценивая лишь степень возрастания напряжений в зоне концентратора, не дает информации о степени снижения предела выносливости детали, содержащей концентратор. Такую информацию дает значение ***эффективного коэффициента концентрации напряжений,*** который рассчитывается по формуле

$$K_\sigma = 1 + q_\sigma (\alpha_\sigma - 1). \qquad (4.43)$$

В формуле (4.43) содержится величина q_σ – ***коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений***, определяемый по формуле

$$q_\sigma = \frac{K_\sigma - 1}{\alpha_\sigma - 1}. \qquad (4.44)$$

Случаи, когда $q_\sigma = 0$, $K_\sigma = 1$ и $q_\sigma = 1$, $K_\sigma = \alpha_\sigma$, характеризуют соответственно нечувствительность и полную чувствительность материала к концентрации напряжений.

Как видно из рисунка 4.24, чувствительность материалов к концентрации напряжений зависит как от свойств материала (в большей степени), так и от формы и состояния поверхности детали (учитываемый параметр α_σ). Применение высокопрочных сталей при изготовлении деталей, содержащих концентраторы и работающих в условиях переменных нагрузок, не всегда целесообразно ввиду высокой чувствительности к концентрации напряжений. Металлы и сплавы с неоднородной структурой, например серый чугун, имеют пониженную чувствительность к концентрации напряжений; чувствительность металлов с крупнозернистой структурой ниже, чем у мелкозернистых.

Достоверные числовые значения эффективного коэффициента концентрации напряжений получают на основе усталостных испытаний образцов, по результатам которых сегодня накоплен обширный экспериментальный материал, сведённый в справочной литературе.

Примеры определения значений эффективных коэффициентов концентрации напряжений приведены на рисунках 4.25 и 4.26.

По известным значениям σ_{-1} или τ_{-1} материала детали и эффективных коэффициентов концентрации напряжений в деталях K_σ или

K_τ определяют пределы выносливости с учётом концентрации напряжений, которые определяются по формулам:

$$\sigma_{-1K} = K_\sigma \cdot \sigma_{-1},$$

$$\tau_{-1K} = K_\tau \cdot \tau_{-1}. \tag{4.45}$$

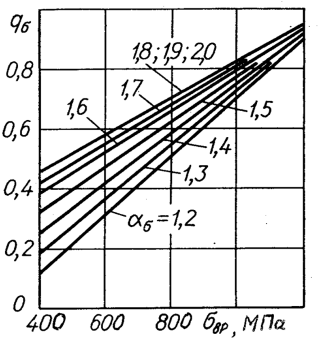


Рис. 4.24 – К определению коэффициента чувствительности материала к концентрации напряжений

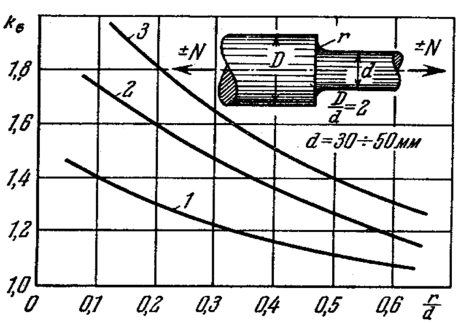


Рис. 4.25 – К определению эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ для случая растяжения образца с галтелью:
1 – образец из стали с $\sigma_{вр}$ = 400 МПа; *2* – то же, $\sigma_{вр}$ = 800 МПа; *3* – то же, $\sigma_{вр}$ = 1200 МПа.

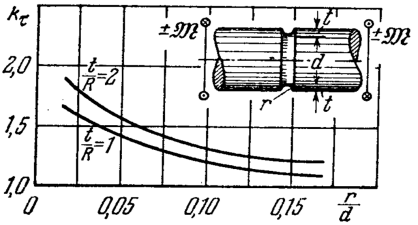


Рис. 4.26 – К определению эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ для случая кручения образца (углеродистая сталь, $\sigma_{вр}$ = 500 МПа) с кольцевой выточкой

Масштабный фактор. Учитывает влияние абсолютных размеров детали на величину предела выносливости. Установлено, что с увеличением размера детали при сохранении её геометрического подобия эффективный коэффициент концентрации напряжений увеличивается. Эта зависимость носит асимптотический характер: начиная с некоторых достаточно больших размеров детали снижение предела выносливости прекращается.

Снижение значений пределов выносливости при возрастании сечений деталей можно объяснить следующими причинами:

– возрастанием количества внутренних концентраторов напряжений в связи с неоднородностью механических свойств поликристаллической структуры детали, что обуславливает различный уровень напряженного состояния отдельных локальных областей детали;

– уменьшением значения предела прочности при увеличении размеров заготовок даже при условии обеспечения качественной термообработки;

– более заметным изменением свойств поверхностного слоя деталей после механической обработки заготовок.

Безразмерная величина, показывающая, на какое число следует уменьшить предел выносливости σ_{-1} или τ_{-1} стандартного лабораторного образца диаметра d_0, чтобы получить соответствующие значения пределов выносливости образца диаметра d, называется ***коэффициентом масштабного фактора,*** который определяется по формуле

$$\varepsilon_\sigma = \frac{(\sigma_{-1})_d}{(\sigma_{-1})_{do}} \text{ и } \varepsilon_\tau = \frac{(\tau_{-1})_d}{(\tau_{-1})_{do}}. \qquad (4.46)$$

Для образцов с концентраторами напряжений коэффициент масштабного фактора определяется по формуле

$$\varepsilon_{\sigma_к} = \frac{(\sigma_{-1к})_d}{(\sigma_{-1к})_{do}} \text{ и } \varepsilon_{\tau_к} = \frac{(\tau_{-1к})_d}{(\tau_{-1к})_{do}}. \quad (4.47)$$

На рисунке 4.27 показана взаимосвязь коэффициента масштабного фактора и диаметра испытываемого образца (шкала d – логарифмическая). Здесь виден асимптотический характер кривых 2 и 3.

Для учёта суммарного влияния концентрации напряжений и абсолютных размеров на предел выносливости введено дополнительное понятие ***эффективного коэффициента концентрации детали***, определяемого по формуле

$$(K_\sigma)_d = \frac{(\sigma_{-1})_{d_0}}{(\sigma_{-1к})_d}. \quad (4.48)$$

Для случая кручения значения такого коэффициента определяется по формуле

$$(K_\tau)_d = 1 + 0,6\left[(K_\tau)_d - 1\right]. \quad (4.49)$$

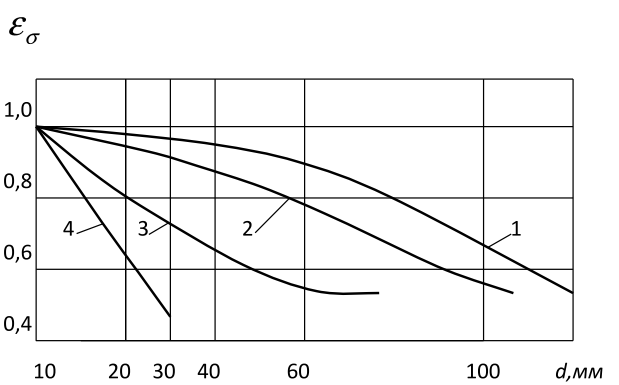


Рис. 4.27 – Зависимость $\varepsilon_\sigma(d)$:
1 – для деталей из углеродистой стали без концентратора; *2* – для деталей из легированной стали ($\sigma_{вр}$ = 1000÷1200 МПа) без концентратора; *3* – то же, с концентратором; *4* – для любой стали при наличии значительной концентрации напряжений.

Влияние состояния поверхности. Качество обработки и механические свойства поверхности оказывают существенное влияние на сопротивление усталости, поскольку в большинстве случаев усталостные разрушения начинаются с поверхностей деталей.

Конкретные особенности, связанные с реальным состоянием поверхности образца, учитываются с помощью ***коэффициента качества поверхности,*** который определяется по формуле

$$\beta = \frac{\sigma_{-1}^{/}}{\sigma_{-1}}, \qquad (4.50)$$

где σ_{-1} – предел выносливости стандартных полированных образцов; $\sigma_{-1}^{/}$ – предел выносливости образцов, имеющих фиксированное качество обработки поверхности.

На рисунке 4.28 и в таблице 4.10 показаны закономерности изменения коэффициента качества поверхности в зависимости от применяемой технологии механической обработки.

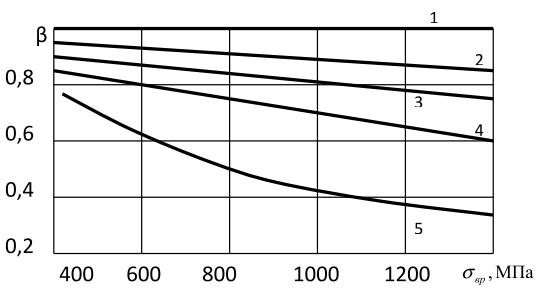


Рис. 4.28 – Зависимость коэффициента качества поверхности от предела прочности при видах обработки:
1 – полирование (β = 1); *2* – шлифование; *3* – тонкая обточка; *4* – грубая обточка; *5* – поверхность без обработки с окалиной.

При обточке образцов, изготовленных из алюминиевых сплавов, коэффициент качества поверхности β = 0,8÷0,9, для магниевых сплавов при той же обработке β = 0,7÷0,8. Весьма чувствительны к качеству обработки титановые сплавы: для них применение токарной обработки снижает значение β на 35%.

Основные технологические способы, с применением которых повышается сопротивление усталости деталей, перечислены в таблице 4.11.

Таблица 4.10 – Зависимость коэффициента качества поверхности от чистоты её обработки

Вид обработки	Высота неровностей *Rz*, мкм	β
Полирование	0,5–1	1,00
Шлифование	1,5–2	0,96–0,98
Чистовое точение	4–10	0,87–0,94
Точение	10–15	0,84–0,88
Грубое точение	20–30	0,78–0,83
Очень грубое точение (обдирка)	50–100	0,70–0,75

Таблица 4.11 – Влияние технологии обработки на значение коэффициента качества поверхности

Вид обработки	Тип образца	Диаметр, мм	β
Закалка токами высокой частоты	Без концентрации	7–20 30–40	1,3–1,6 1,2–1,5
	С концентратором	7–20 30–40	1,6–2,8 1,5–2,5
Азотирование на глубину 0,1÷0,4 мм	Без концентрации	8–15 30–40	1,15–1,25 1,10–1,15
	С концентратором	8–15 30–40	1,9–3,0 1,3–2,0
Цементация на глубину 0,2÷0,6 мм	Без концентрации	8–15 30–40	1,2–2,1 1,1–1,5
	С концентратором	8–15 30–40	1,5–2,5 1,2–2,0
Обкатка роликами	Без концентрации	7–20 30–40	1,2–1,4 1,1–1,25
	С концентратором	7–20 30–40	1,5–2,2 1,3–1,8
Дробеструйная обработка	Без концентрации	7–20 30–40	1,1–1,3 1,1–1,2
	С концентратором	7–20 30–40	1,4–2,5 1,1–1,5

Резкое снижение предела выносливости отмечается при воздействии на деталь коррозионной среды. С ростом предела прочности

стали заметно усиливается отрицательное влияние коррозии на сопротивление усталости (рис. 4.29); это может объясняться большей чувствительностью высокопрочных сталей к концентрации напряжений, неизбежно возникающей в зонах коррозионных повреждений.

В расчётах на усталость влияние коррозионной среды учитывается с помощью коэффициента, который рассчитывается по формуле

$$\beta_{кор} = \frac{\sigma_{-1кор}}{\sigma_{-1}}, \qquad (4.51)$$

где $\sigma_{-1кор}$ и σ_{-1} – соответственно пределы выносливости стандартных гладких образцов в коррозионной среде и на воздухе.

Для расчёта предела выносливости детали с концентрацией напряжений в условиях коррозии используют уравнение

$$K_{\sigma Dкор} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1Dкор}} = \frac{K_\sigma}{E_\sigma} + \frac{1}{\beta_{кор}} - 1, \qquad (4.52)$$

где $\sigma_{-1Dкор}$ – предел выносливости натурной детали при той же частоте и базе испытаний, при которых определяется $\beta_{кор}$.

В условиях воздействия коррозионной среды усиливается влияние асимметрии цикла на сопротивление усталости: при этом растягивающие средние напряжения цикла резко снижают значение предела выносливости, а наложение статических сжимающих напряжений способствует стабилизации значения предела выносливости детали практически в любой коррозионной среде.

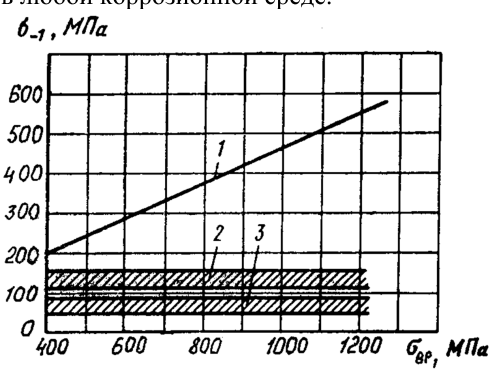


Рис. 4.29 – Зависимость σ_{-1} ($\sigma_{вр}$) для сталей в различных средах:
1 – атмосферный воздух; *2* – пресная вода; *3* – морская вода.

Наиболее эффективными технологическими способами повышения пределов выносливости деталей в коррозионных средах являются наклеп поверхности, поверхностная закалка, азотирование. Так, применение этих технологий повышает значение предела выносливости образцов из стали 45 в морской воде соответственно в 2,5, 2 и 3,5 раза.

Причиной положительного влияния названных методов является формирование значительных остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей, что препятствует образованию и развитию усталостных повреждений.

Влияние режимов нагружения. *Частота нагружения* для большинства материалов не оказывает существенного влияния на их сопротивление усталости при нормальной температуре и отсутствии активной коррозионной среды. В интервалах частот нагружения 5–200 Гц (рабочий диапазон частот деталей мобильных машин) предел выносливости может увеличиваться на 2–8%, а при частотах нагружения до 1000 Гц – на 5–15%.

В тех же случаях, когда при эксплуатации или испытании деталей протекают интенсивные физико-химические процессы (например, коррозия), связанные с изменением структурных свойств материала детали, частота нагружения может оказывать значительное влияние, и её необходимо учитывать с учётом конкретных условий работы детали.

Влияние температуры. При повышении температуры величина предела выносливости обычно уменьшается, а при её понижении до значений, индивидуальных для каждого материала, величина предела выносливости возрастает.

Для большинства конструкционных сталей при температуре выше 300°С предел выносливости уменьшается на 15–20% на каждые 100°С повышения температуры. В области высоких температур кривая усталости сталей не имеет горизонтального участка, а влияние концентрации напряжений, как правило, уменьшается.

При понижении температуры с 20°С до –190°С предел выносливости может увеличиваться более чем в 2 раза при одновременном понижении ударной вязкости.

Влияние тренировки. Тренировкой материала называют способ нагружения с последовательным повышением величины переменных нагрузок со значений, меньших предела выносливости. Применение рациональных методик тренировки позволяет значительно повысить

предел выносливости «тренируемых» деталей. Тренировка широко используется в практике эксплуатации мобильных машин в период их обкатки.

Влияние перегрузок. Нагрузки выше предела выносливости влияют на его величину в зависимости от характера перегрузки. При малых перегрузках до достижения некоторой наработки, индивидуальной для конкретных материалов, сопротивление усталости повышается, при больших перегрузках – снижается.

Влияние пауз. Паузы (перерывы в нагружении) влияют на сопротивление усталости в зависимости от их продолжительности и порядка чередования. При определенном сочетании этих факторов за счёт пауз усталостная долговечность может быть увеличена на 15–20%. При этом длительность пауз влияет на долговечность слабее, чем их частота.

Учёт различных факторов, влияющих на изменение величины предела выносливости конкретной детали, в конечном итоге определяет величину коэффициента перехода $K_{\sigma Д}$, который в общем виде может быть определен по формуле

$$K_{\sigma Д} = \prod_{i=1}^{i=n} K_i , \qquad (4.53)$$

где n – количество учитываемых факторов; K_i – коэффициент, учитывающий влияние на $\sigma_{-1Д}$ конкретного единичного фактора.

Методика, основанная на определении характеристик сопротивления усталости стандартных лабораторных образцов и последующем переходе к характеристикам сопротивления усталости деталей посредством коэффициента $K_{\sigma Д}$ (формула (4.53)), имеет ограниченное применение. Даже в случаях рассмотрения сопротивления усталости несложных деталей этой методикой следует пользоваться очень осторожно, внимательно анализируя всю совокупность факторов, оказывающих влияние на величины характеристик сопротивления усталости, поскольку ошибка при их определении на 20–30% приводит к отклонению расчётной оценки долговечности от реального значения в десятки раз.

Поэтому для сложных деталей и узлов характеристики сопротивления усталости определяют путём испытаний натурных конструкций или их отдельных зон и участков.

Для оценки сопротивления усталости таких крупногабаритных и дорогостоящих объектов, как, например, несущие системы транспортных машин, целесообразно проводить испытания их локальных

моделей. Это объясняется тем, что долговечность сложных объектов лимитируется отдельными элементами или соединениями, повышение ресурса которых ведет к увеличению ресурса всего объекта.

Под локальной моделью понимается фрагмент конструкции, включающий часть или весь опасный объём, в пределах которого обеспечена идентичность параметров и технологии изготовления, а также удовлетворяются условия подобия параметров, характеризующих процесс усталостного разрушения.

На рисунке 4.30 показана схема декомпозиции рамы грузового автомобиля на отдельные участки конструкции, которые в зависимости от поставленных задач могут быть изготовлены отдельно и использоваться в качестве локальных моделей для определения характеристик сопротивления усталости.

Назначаемые в рамках рассматриваемого метода критерии соответствия натурной конструкции и локальной модели следующие:

– идентичность напряженно-деформированного состояния реальных областей конструкции и модели, в которых формируются и развиваются на начальном этапе усталостные трещины;

– равенство поперечных сечений элементов, составляющих конструкцию и модель;

– тождественность остаточных напряжений в конструкции модели;

– идентичность материалов элементов конструкции модели;

– идентичность технологии соединения элементов.

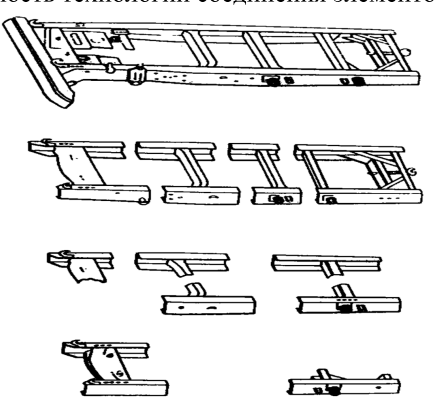


Рис. 4.30 – Схема декомпозиции несущей системы автомобиля как основа локального моделирования

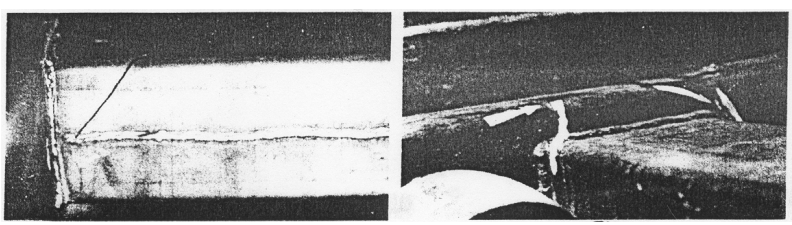
При этом предполагается, что результаты испытаний на усталость локальных моделей, удовлетворяющих всем перечисленным критериям, могут служить оценкой долговечности натурной конструкции при существенно упрощенных условиях испытаний.

Пример определения характеристик сопротивления усталости с использованием принципа локального моделирования.

Процесс создания и исследования локальных моделей показан на примере рамы большегрузного прицепа и включает шесть этапов.

1. Анализ эксплуатационных разрушений натурных конструкций.

Усталостные трещины в рамах при эксплуатации зарождаются и распространяются преимущественно в зонах соединения сваркой лонжеронов с поперечинами (рис. 4.31) или кронштейнами опорных устройств и рессор. Долом в результате недостатка прочности опасного сечения может происходить как по сварным швам, так и по соединяемым деталям. Следовательно, сопротивление рамы усталости определяется повреждениями некоторого опасного объёма материала (сварного шва и прилегающего основного металла), в пределах которого параметры, характеризующие процесс разрушения, достигают критического уровня.



а *б*

Рис. 4.31 – Усталостные разрушения в узлах рамы полуприцепа ОЗТП-9554:
а – вид на поперечину; *б* – вид на узел соединения поперечины со стенкой лонжерона.

2. Оценка напряженно-деформированного состояния опасных зон конструкции в условиях эксплуатации и определение видов

нагружения, вносящих наибольший вклад в накопление повреждения.

В рамках применяемого экспериментально-расчётного метода на первом этапе по данным тензометрирования определяются напряжения вблизи краев полок и стенок исследуемых лонжеронов и поперечин как тонкостенных элементов, где (согласно закону парности касательных напряжений) напряженное состояние полностью определяется нормальными напряжениями. Используя линейный закон изменения напряжений в полках и стенках элементов и известные координаты размещения тензорезисторов, определяются действительные нормальные напряжения в угловых точках сечений.

Затем проводится выделение составляющих напряжений от действия основных видов нагружения (кручение, изгиб, растяжение – сжатие) по методике, основанной на теориях тонкостенных стержней и оболочек. Установлено, что при испытаниях необходимо и достаточно воспроизводить три компонента эксплуатационного нагружения: изгибы в вертикальной и горизонтальной плоскостях и кручение.

3. Изготовление локальной модели при воспроизведении конструкторско-технологических факторов, влияющих на характеристики сопротивления усталости опасных зон.

Принципиальное значение для моделирования многостадийного процесса усталостного разрушения представляют две стадии: рассеянного разрушения и роста магистральной трещины. При оценке долговечности с учётом живучести в условиях регламентированного разрушения, учитывающей обе стадии разрушения, в качестве опасной зоны необходимо рассматривать весь прилегающий к опасному сечению объём металла.

Совпадение значений остаточных напряжений от сварки в натурной конструкции и в вырезанной из нее модели, содержащей лишь участок сварного шва, принципиально невозможно, так как модель освобождается от влияния остаточных напряжений всего периметра шва конструкции. Поэтому, исходя из продольной симметрии рамы и необходимости сохранения целостности сварных швов, в качестве локальной модели использовался фрагмент рамы (рис. 4.32*а*), содержащий узел соединения участка лонжерона и участка поперечины цельным сварным швом по технологии, применяемой в серийном производстве.

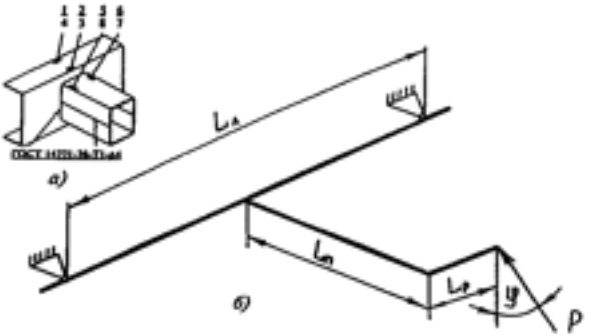


Рис. 4.32 – Локальная модель (*а*) и схема её нагружения (*б*):
1–8 – тензодатчики (с номерами, указанными в знаменателе, расположены на нижних полках сечений).

4. Обеспечение нагружения локальной модели, адекватного эксплуатационному по компонентному составу.

Схема нагружения локальной модели при испытаниях (рис. 4.32*б*) реализуется с помощью устройства (рис. 4.33), состоящего из подшипникового узла *1*, служащего для восприятия нагрузки от силовозбудителя, рычага *2* с направляющими *3*, соединенного с фланцем *4*, который крепится на поперечине *5* локальной модели посредством монтажных сварных швов, а также двух болтовых зажимов *6*, закрепляющих участок лонжерона *7* через упоры *8* на основании *9* в разнесенных по длине лонжерона точках.

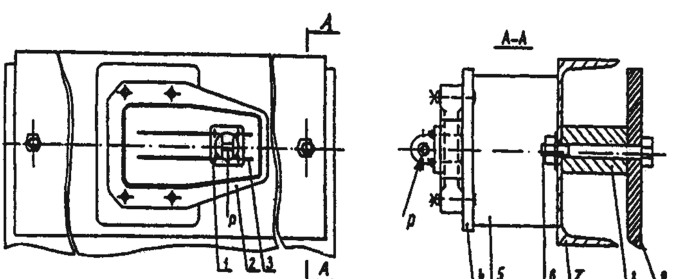


Рис. 4.33 – Силонагружатель стенда для испытаний локальных моделей рам

Нагружение локальной модели осуществляется силой P через рычаг под углом к оси поперечины, благодаря чему возникает крутящий момент на поперечине и две составляющие нагружающей силы – горизонтальная и вертикальная. Закрепление участка лонжерона в двух разнесенных по длине точках обеспечивает возможность его вертикального и горизонтального изгиба в пролете между точками закрепления. При этом горизонтальный изгиб создается горизонтальной составляющей нагружающей силы, вертикальный изгиб – её вертикальной составляющей, а стесненное кручение – совместным действием сосредоточенных крутящих моментов, образованных обеими составляющими нагружающей силы, линии действия которых проходят в общем случае не через линию центров изгиба профиля лонжерона. При этом поперечина подвергается кручению и вертикальному изгибу. В предлагаемой схеме остаются нереализованными напряжения растяжения – сжатия лонжерона, однако исследования показывают, что их величина в раме незначительна.

Испытания должны вызывать разрушения локальной модели в качественном и количественном соответствии с эксплуатационными. Этого можно добиться обеспечением определенных размеров локальных моделей и параметров силонагружателя испытательной установки. Получены следующие выражения для расчёта необходимых параметров:

– длина поперечины локальной модели определяется по формуле

$$L_n = \frac{\sigma_{\omega}^{л} I_{\omega} k_{л} sh(k_{л})}{P_{в} L_{л} sh^2(k_{л}/2)\omega} + etg\varphi + a_x^{л}; \qquad (4.54)$$

– длина рычага приложения нагрузки – по формуле

$$L_p = \frac{\sigma_{\omega}^{n} I_{\omega} k_n}{P_{в} L_u L_n \omega \left(ch\frac{k_n}{L_n} th(k_n) - sh\frac{k_n}{L_n} \right)}; \qquad (4.55)$$

– сила максимального нагружающего воздействия – по формуле

$$P = \frac{4\sigma_e^n \ L_k}{LY\cos\varphi}; \qquad (4.56)$$

– угол между направлением действия нагружающей силы и плоскостью, перпендикулярной оси поперечины, определяется по формуле

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\sigma_г^л I_y Y / \sigma_в^л I_x X\right). \qquad (4.57)$$

В формулах (4.54)–(4.57): I_x, I_y, I_ω и X, Y, ω – соответственно линейные и секториальные моменты инерции профилей элементов и координаты точек действия приведенных напряжений; $a_x^л$ – координата центра изгиба профиля лонжерона; e – вертикальный эксцентриситет закрепления поперечины; L_u – расстояние от соединения поперечины с лонжероном до точки на поперечине, в которой определяются напряжения при тензометрировании; $k_л$ и $k_п$ – характеристические числа, зависящие от отношения жесткости при чистом кручении к секториальной жесткости, соответственно для лонжерона и поперечины; $P_в$ – вертикальная составляющая силы нагружающего воздействия; $\sigma_в^л, \sigma_г^л, \sigma_\omega^л$ и $\sigma_\omega^п$ – компоненты напряжений, действующих соответственно в лонжероне и поперечине.

Длина рычага приложения нагрузки регулируется перемещением подшипникового узла *1* по направляющим *3* рычага *2*, а угол передачи нагрузки на рычаг и величины нагрузки устанавливается регулировкой нагружателя. Возможность варьирования компонентами нагрузки приближает условия испытаний к эксплуатационным.

5. Проведение испытаний локальных моделей и определение их характеристик сопротивления усталости.

Для построения кривой усталости количество локальных моделей для испытаний назначается так же, как и в случае испытаний стандартных лабораторных образцов, – в зависимости от требуемой точности результатов. Критерии предельного состояния для прекращения испытаний каждой локальной модели назначаются индивидуально для каждого класса конструкций. В рассматриваемом случае испытаниям подвергались 10 локальных моделей. Нагружение осуществлялось по схеме (рис. 4.32) с использованием силонагружателя (рис. 4.33), в качестве силовозбудителя использован гидроцилиндр. Испытания прекращались при наличии трещин усталости в соединении лонжерона с поперечиной длиной более 40% от периметра его поперечного сечения. Средняя живучесть моделей составила 40,4% от общей наработки.

Для построения линии регрессии, описывающей левую ветвь кривой усталости, использовано трехпараметрическое уравнение

$$N = \frac{Q}{\sigma}\ln\left\{1+\left[\exp\left(\frac{\sigma-\bar{\sigma}_R}{\nu_0}\right)-1\right]^{-1}\right\}, \qquad (4.58)$$

где $\bar{\sigma}_R$ – выборочное среднее значение предела выносливости; N – число циклов приложения нагрузки до разрушения; σ – максимальное напряжение цикла; Q – коэффициент выносливости; ν_0 – параметр, характеризующий наклон кривой усталости в полулогарифмической системе координат.

Параметры ν_0 и Q определяются по методу наименьших квадратов разности $\left(\sigma_{R_i}-\bar{\sigma}R\right)^2$, где σ_{R_i} – частное значение предела выносливости i-й модели путём перебора ряда значений Q. Переход к стандартным характеристикам сопротивления усталости несложен: число циклов до точки перелома кривой усталости N_G опреляется по формуле

$$N_G = Q/\bar{\sigma}_R, \qquad (4.59)$$

а параметр m, характеризующий угол наклона левой ветви кривой, построенной в двойных логарифмических координатах, при известных N_G и σ_R определяется методом наименьших квадратов или оценивается котангенсом угла наклона левой ветви кривой усталости:

$$m = ctg\alpha = \frac{lg\,N_G - lg\,N_i}{lg\,\sigma_i - lg\,\sigma_R}, \qquad (4.60)$$

где N_i и σ_i – координаты любой точки кривой усталости из области напряжений, превышающих предел выносливости.

Полученное уравнение линии регрессии левой ветви усталости

$$\lg\sigma = 3{,}813 - 0{,}321\,\lg N \qquad (4.61)$$

имеет следующие характеристики:

$$\overline{\sigma}_R = 72{,}5 \text{ МПа}; \; N_G = 1{,}240 \cdot 10^6 \text{ циклов}; \; m = 3{,}12.$$

Объём испытанной выборки позволил определить характеристики сопротивления усталости с достаточной точностью: например, $\overline{\sigma}_R$, исходя из доверительного интервала, определено с точностью 5,5%.

6. Идентичность разрушений натурной конструкции в эксплуатации и модели при стендовых испытаниях.

Результаты испытаний локальных моделей хорошо согласуются с результатами стендовых, полигонных и эксплуатационных испытаний натурных рам. Места зарождения и характер развития трещин в локальных моделях идентичны эксплуатационным (рис. 4.34), что подтверждает правильность построения локальной модели и назначения режима испытаний.

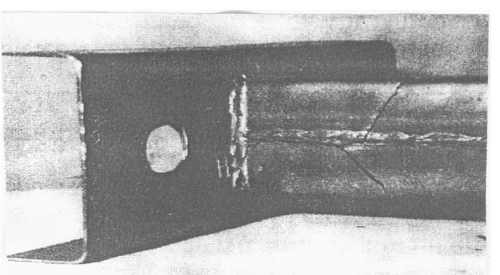


Рис. 4.34 – Типичное разрушение локальной модели

С помощью метода локального моделирования с требуемой точностью при невысоких затратах решается задача определения характеристик сопротивления усталости с целью отработки конструкций и технологий изготовления и ремонта несущих систем мобильных машин.

Прогнозирование усталостной долговечности

Прогнозирующий расчёт долговечности является завершающим этапом решения единого комплекса задач, связанных с исследованием усталостной долговечности деталей машин. При расчёте долговечности совместно используются данные о характеристиках сопро-

тивления усталости объекта (свойства конструкции) и об его эксплуатационной нагруженности.

Ниже рассмотрен пример прогнозирующего расчёта долговечности рамы большегрузного полуприцепа ОЗТП-9554. Данный объект выбран, поскольку он, во-первых, является продуктом крупносерийного производства, и, во-вторых, режимы эксплуатации таких машин весьма вариативны. Поскольку выше показано, что долговечность несущих систем лимитируют их узлы, материалы этого раздела изложены применительно к узлам рам.

Для получения количественной информации о распределении всех необходимых параметров случайного процесса нагружения используют аппарат теории случайных функций. Представление случайного процесса в цифровой или графической форме, удобной для расчёта долговечности и планирования испытаний, сопряжено с рядом допущений, принятие которых сопровождается потерей информации о процессе.

Поэтому весьма существенным моментом при анализе случайного процесса нагружения является выбор оптимального метода схематизации, сущность которого состоит в замене реального случайного процесса более простым, эквивалентным реальному по повреждающему воздействию.

Кратко рассмотрим методы схематизации, нашедшие наиболее широкое распространение.

Метод максимумов учитывает только максимумы, значения которых превышают среднее напряжение. При этом предполагается, что распределение минимумов симметрично распределению максимумов относительно среднего напряжения. Этот метод дает заниженное значение расчётной долговечности по сравнению с фактическим.

Метод экстремумов учитывает только максимумы, лежащие выше среднего напряжения, и минимумы, лежащие ниже среднего напряжения. Распределение максимумов в большинстве случаев симметрично распределению минимумов, поэтому метод экстремумов также дает заниженную оценку расчётной долговечности по сравнению с фактической.

Метод учёта одного экстремума между двумя соседними пересечениями среднего уровня на каждом участке осциллограммы учитывает лишь экстремум с наибольшей амплитудой. При этом из рассмотрения выпадают экстремумы, обладающие значительным по-

вреждающим воздействием, и метод приводит к процессу, менее повреждающему, чем реальный.

Метод пересечений заключается в подсчёте числа пересечений процессом заданных уровней напряжений. Аналогично методу максимумов приводит к процессу с повреждающим воздействием, превышающим реальное.

Метод размахов состоит в том, что за амплитуду напряжений принимают половину размаха между двумя соседними экстремумами, причем учитываются все экстремумы. Приводит к схематизированному процессу, обладающему меньшим повреждающим действием, чем реальный процесс. Метод имеет две модификации: укрупненных размахов и размахов, превышающих заданное значение.

Метод ординат состоит в том, что реальный случайный процесс заменяют рядом дискретных реализаций с постоянным шагом дискретизации по времени. Приводит к схематизированному процессу, обладающему меньшим повреждающим воздействием, чем реальный процесс.

Метод полных циклов сводится к подсчёту и постепенному исключению высокочастотных колебаний с малой амплитудой, что позволяет выделить основной колебательный процесс. В отличие от метода размахов, метод полных циклов не исключает из рассмотрения малые размахи, находящиеся внутри больших. Метод полных циклов обычно приводит к расчётным оценкам ресурса, занимающим промежуточное положение между оценками, полученными с использованием методов максимумов и размахов.

Общим недостатком рассмотренных методов является то, что они не учитывают асимметрию нагружения, существенным образом влияющую на сопротивление деталей машин усталости. Этот недостаток устраняется с применением метода анализа полуциклов напряжений, предложенного профессором Е. К. Почтенным. Идея этого метода заключается в трансформации вариационного ряда случайных амплитуд σ_{max} с произвольными коэффициентами асимметрии к отнулевым или симметричным циклам.

Расчётные зависимости для перехода:

– к отнулевому циклу

$$\sigma = \sigma_{\max} - (a_0 - 1) \cdot \sigma_0; \tag{4.62}$$

– к симметричному циклу

$$\sigma = \sigma_{\max} - (a_1 - 1) \cdot \sigma_{-1}; \tag{4.63}$$

При этом

$$a_0 = \frac{1+\psi_\sigma}{2-(1-\psi_\sigma)(1+r)}; \tag{4.64}$$

$$a_1 = \frac{2}{2-(1-\psi_\sigma)(1+r)}, \tag{4.65}$$

где ψ_σ – коэффициент чувствительности материала к асимметрии нагружения.

Однако точность этого метода снижает линейное представление диаграммы предельных амплитуд.

Для узкополосных случайных процессов различные методы схематизации процесса приводят практически к одинаковым результатам, а для широкополосных случайных процессов получаются различия в оценке уровня нагруженности. При использовании различных методов схематизации для расчёта долговечности в общем случае можно получить результаты, соотношения которых лежат в пределах 0,26–1,9.

Для произвольного случайного процесса не существует универсального метода схематизации. Выбор метода схематизации производится, исходя из особенностей нагружения деталей и требуемой точности расчёта долговечности. Однако опыт исследования несущих и ходовых систем транспортных машин показывает, что для оценки долговечности их элементов оптимальными методами схематизации процессов нагружения (как правило, широкополосных) являются методы ординат, полных циклов и анализа полуциклов напряжений.

Вариационный ряд случайных амплитуд эксплуатационных напряжений (деформаций, перемещений), полученный в результате обработки осциллограмм, подвергается дальнейшей математической обработке с целью получения функции распределения амплитуд напряжений, позволяющей оценить вероятность превышения процессом заданного уровня. При анализе нагруженности деталей несущих систем транспортных средств функция распределения чаще всего используется для оценки максимальных значений процесса и вероятностей их появления.

Реальный режим эксплуатации транспортных средств можно охарактеризовать как многократное повторение блоков нагрузок, эквивалентных одному технологическому циклу (одной поездке или одному километру пробега). Кроме того, во многих случаях блок

нагружения является мерой оценки усталостной долговечности при нестационарном нагружении.

Формирование блока для режима нагружения, описанного законом распределения Вейбулла, осуществляется в таком порядке:

– назначается объём блока;

– систематизированный спектр напряжений разбивается на ступени;

– определяются средние значения для каждой ступени с использованием зависимости:

$$\sigma_i = a(-2.3026 \lg(\sum n_i / n_{бл}))^{1/b} + c, \qquad (4.66)$$

где a, b, c – параметры закона распределения Вейбулла;

– определяются отношения β_i числа циклов на i-й ступени к общему числу циклов в блоке $n_{бл}$;

– определяются числа циклов нагружения на i-й ступени:

$$n_i = \beta_i n_{бл}. \qquad (4.67)$$

Для дискретного представления нагрузочного режима, используемого в расчётах долговечности, сформированы десятиступенчатые блоки размером $n_{бл} = 10^4$ циклов. Параметры нагрузочных блоков узлового соединения рамы при движении полуприцепа по разбитой грунтовой дороге (режим Б) приведены в таблице 4.12. Графическое представление расчётных блоков нагружения узла рамы (см. рис. 4.35).

Таблица 4.12 – Параметры нагрузочных блоков

№ ступени	β_i	N_i	σ_i, МПа, при режиме	
			A	B
1	0,0001	1	152	115
2	0,0002	2	144	109
3	0,0007	7	133	100
4	0,002	20	123	92
5	0,007	70	110	82
6	0,02	200	97	73
7	0,07	700	80	59
8	0,2	2000	62	45
9	0,3	3000	52	38
10	0,4	4000	29	24

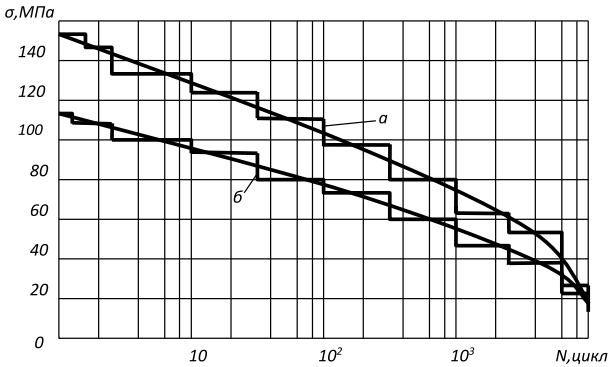


Рис. 4.35 – Расчётный блок нагружения узла рамы:
а – движение по РГД; *б* – движение по УГД.

Наиболее широкое распространение в инженерной практике получили феноменологические методы прогнозирующей оценки долговечности, основанные:

– на прямом применении гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений;

– на применении корректированной линейной гипотезы;

– на применении кинетической теории усталости.

Из перечисленных методов самым простым вариантом для практического использования является применение линейной гипотезы суммирования повреждений. В то же время реальный физический процесс накопления повреждений наиболее точно отражает кинетическая теория усталости, учитывающая снижение предела выносливости материала в процессе эксплуатации. Поэтому рациональным представляется использование расчётного метода, синтезирующего положительные моменты применения различных методов – основанного на гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений и учитывающего снижение предела выносливости в соответствии с основными принципами кинетической теории усталости.

Учитывая, что в отечественных и зарубежных источниках преобладающей является информация по результатам исследований усталостной долговечности различных конструкционных материалов при явном недостатке материалов по исследованию долговечности реальных конструкций, в настоящем разделе прогнозирующая оценка

долговечности производилась с использованием перечисленных выше методов.

Эффективность методов расчёта долговечности по критерию усталости. В качестве исходных данных для расчёта взяты параметры обобщенного нагрузочного режима, представленного десятиступенчатым полублоком (рис. 4.28): σ_R = 63,6 МПа, N_G = 2 млн циклов, m = 3,12.

Расчёт долговечности с использованием гипотезы линейного суммирования повреждений производится на основе уравнения Баскуина:

$$N_i = N_G \left[\frac{\sigma_R}{\sigma_i} \right]^m . \qquad (4.68)$$

Предельное состояние объекта обозначается условием Пальмгрена – Майера:

$$\sum_{i=1}^{r} \frac{n_i}{N_i} = 1. \qquad (4.69)$$

Процесс снижения предела выносливости, имеющий место при накоплении усталостных повреждений, здесь не учитывается.

В корректированной линейной гипотезе профессора В. П. Когаева этот процесс учитывается коэффициентом нижней границы повреждающих напряжений, выбираемым априорно из интервала эмпирических значений 0,2…1,0. Кроме того, при использовании корректированной линейной гипотезы необходимо определить значение суммы относительных долговечностей a_p, зависящее от закона распределения напряжений и косвенно через предел выносливости, от материала, конструктивных и технологических факторов.

Корректированная линейная гипотеза В. П. Когаева определяет предельное состояние условием

$$\sum_{i=1}^{l} \frac{n_i}{N_i} = a_p = \frac{\sigma_{\max} \sum_{i=1}^{l} \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} - K\sigma_R}{\sigma_{\max} - K\sigma_R} = \frac{\sum_{i=1}^{l} \sigma_i t_i - K\sigma_R}{\sigma_{\max} - K\sigma_R}, \qquad (4.70)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальная амплитуда программного блока; σ_i – значение амплитуды напряжений на i-й ступени программного блока; K – коэффициент нижней границы повреждающих напряжений; l – количество ступеней в программном блоке, превышающих нижнюю гра-

ницу повреждающих напряжений; $t_i = n_i / N_б^*$ – относительная частота действия амплитуд напряжений *i*-го уровня; $N_б^*$ – суммарное число циклов в блоке после отбрасывания неповреждающих ступеней с $\sigma_i < K\sigma_R$.

При этом ресурс, выраженный количеством блоков нагружения, рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{a_p \sigma_R^m N_G}{\sum_{i=1}^{r} \sigma_i^m t_i}. \qquad (4.71)$$

Расчётное значение циклической долговечности L_p определяется, исходя из заданного числа циклов в блоке $N_б$ по формуле

$$L_p = \lambda N_б. \qquad (4.72)$$

Известные погрешности, связанные с применением линейной и корректированной линейной гипотез, предопределили необходимость анализа гипотез, синтезирующих линейную гипотезу с кинетической теорией усталости. Её основой является учёт влияния изменений факторов сопротивления усталости на долговечность. Основным из этих факторов является предел выносливости. Его снижение в процессе накопления усталостных повреждений описывается критериями, которые рассмотрены на рисунке 4.29:

Д. Генри
$$\sigma_{Ri} = \sigma \frac{1 - \frac{n_i}{N_i}}{\frac{\sigma}{\sigma_R} - \frac{n_i}{N_i}}; \qquad (4.73)$$

С. В. Серенсена
$$\frac{\sigma_{Ri}}{\sigma_R} = 1 - \left(\frac{n_i}{N_i}\right)\left(\frac{\sigma}{\sigma_R} - 1\right)\frac{1}{\frac{\sigma}{\sigma_R} - \left(\frac{n_i}{N_i}\right)^2}; \qquad (4.74)$$

М. Я. Шашина
$$\frac{\sigma_{Ri}}{\sigma_R} = 1 - \left(\frac{n_i}{N_i}\right)\left(\frac{\sigma}{\sigma_R} - 1\right)\exp\left(\frac{m_i}{m}\right); \qquad (4.75)$$

Е. К. Почтенного

$$\sigma_{Ri}=\sigma_R\left(1-\frac{n_i}{N_i}\right)^{1/m}, \qquad (4.76)$$

а также разработанным с участием автора φ-критерием:

$$\sigma_{R_i}=\varphi\cdot\sigma_R(1-\frac{n_i}{N_i})^{1/\varphi\cdot m}; \qquad (4.77)$$

$$\varphi=\exp(\frac{n_i}{N_i}\lg\frac{\sigma}{\sigma_R}), \qquad (4.78)$$

где σ_{Ri},σ_R – предел выносливости поврежденного и исходного материала; n_i/N_i – доля выработанного ресурса при напряжении σ по исходной кривой усталости; σ/σ_{Ri} – степень перегрузки; m, m_i – характеристики угла наклона левой ветви первичной и вторичной кривых усталости в двойной логарифмической системе координат; φ – кинетический коэффициент накопления усталостного повреждения.

При расчёте долговечности с использованием зависимостей (4.73)–(4.78) на каждой ступени нагрузочного блока рассчитывается снижение предела выносливости при условии, что напряжение i-й ступени выше текущего значения предела выносливости; в противном случае ступень считается неповреждающей.

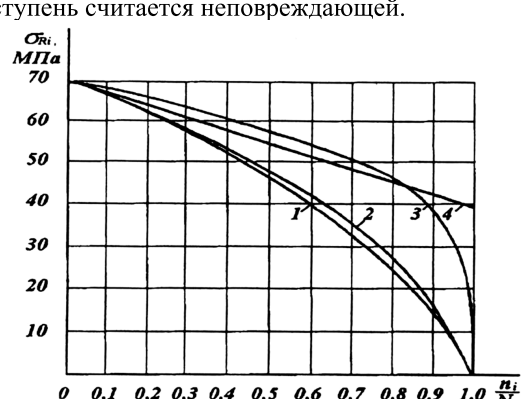


Рис. 4.36 – Снижение предела выносливости при накоплении усталостных повреждений, описываемое критериями:
1 – Д. Генри; *2* – С. В. Серенсена; *3* – Е. К. Почтенного;
4 – М. Я. Шашина.

После прохождения всех ступеней цикл повторяется снова, при этом относительное повреждение от каждой последующей ступени суммируется с предыдущим. Текущее значение долговечности определяется суммированием числа циклов от каждой ступени. Окончательное значение долговечности определяется при достижении суммой относительных долговечностей значения, равного единице.

Результаты расчёта циклической долговечности узловых соединений рамы описанными методами сведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Результаты расчёта циклической долговечности узла рамы полуприцепа

№	Метод расчёта	Расчётная долговечность N_i, циклов	Средняя фактическая долговечность, циклов	Относительная погрешность, %
1	Линейная гипотеза	2 564 338	1 975 452	29,8
2	Корректированная линейная гипотеза (a_p = 0,2)	568 914		–71,2
3	Критерий Д. Генри	1 231 800		–37,6
4	Критерий С. В. Серенсена	1 235 044		–37,4
5	Критерий Е. К. Почтенного	1 410 870		–28,6
6	Критерий М. Я. Шашина	1 466704		–25,7
7	φ-критерий	1 808 837		–8,4

* Знак «–» указывает на погрешность в запас долговечности.

Для определения степени смещённости расчётных оценок долговечности проведены программные стендовые испытания десяти локальных моделей шестиступенчатым блочным нагружением. В результате испытаний получен средний фактический ресурс $L_Ф$ = 1975452 цикла.

Сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными позволяет заключить, что наибольшая точность расчётных оценок долговечности обеспечивается φ-критерием снижения предела выносливости, при этом ошибка прогноза по сравнению со средним фактическим ресурсом не превышает 10%, что является приемлемым для инженерной практики.

Расчёт циклической долговечности узла рамы произведен для двух выбранных режимов эксплуатации. Параметры режимов в виде нагрузочных блоков приведены в таблице 4.12, характеристики со-

противления усталости: σ_R = 69,2 МПа; $N_G = 1{,}24 \cdot 10^6$ цикла; m = 3,12. Результаты расчёта сведены в таблице 4.14.

Первичный анализ результатов, приведённых в таблицах 4.13 и 4.14, показывает, что долговечность, вычисленная по линейной гипотезе, превышает долговечность, вычисленную по корректированной линейной гипотезе, более чем в 5 раз и долговечность, вычисленную с использованием критериев снижения предела выносливости, в 1,41–2 раза.

Завышенные расчётные значения долговечности, полученные при использовании линейной гипотезы, как указывалось выше, объясняются тем, что в этом случае не учитывается повреждающее воздействие напряжений ниже предела выносливости.

Таблица 4.14 – Результаты расчёта циклической долговечности узла рамы полуприцепа ОЗТП-9554

№	Метод расчёта	Режим эксплуатации*	Расчётная долговечность N_i, тыс. циклов
1	Линейная гипотеза	A	5 443,45
		B	26991,177
2	Корректированная линейная гипотеза с расчётным значением a_p	A	101,559
		B	–2 722,19
3	Корректированная линейная гипотеза с заданным значением (a_p = 0,2)	A	1 088,69
		B	5 398,235
4	Критерий Д. Генри	A	2 833
		B	18 851
5	Критерий С. В. Серенсена	A	2 883
		B	18 851
6	Критерий Е. К. Почтенного	A	2 581
		B	13 490
7	Критерий М. Я. Шашина	A	3 753
		B	3 753
8	φ-критерий	A	3 713
		B	17 160

*А – разбитая грунтовая дорога (РГД); В – грунтовая дорога в удовлетворительном состоянии (УГД).

Требуют комментариев результаты прогнозирующего расчёта долговечности с использованием корректированной линейной гипо-

тезы. Здесь зафиксированы отрицательные значения циклических долговечностей. Объяснить это можно, рассмотрев зависимость (4.61), определяющую численное значение величины a_p. Анализ зависимости (4.61) показывает, что, когда нагрузочный блок характеризуется невысокой степенью перегрузки для большинства ступеней, выражение в числителе формулы (4.61) может принимать отрицательное значение, что и зафиксировано. В таких случаях должна быть назначена величина $a_p = 0{,}2$.

Более детальный анализ результатов, приведенных в таблицах 4.13 и 4.14, может быть проведен после сопоставления результатов расчёта ресурса в единицах наработки с результатами исследования долговечности в условиях реальной эксплуатации и полигонных испытаний.

Обоснование повреждающего воздействия различных эксплуатационных режимов нагружения.

Оценка ресурса узла рамы полуприцепа в единицах наработки (пробег в км) в зависимости от характеристик микропрофилей дорог производится в три этапа.

На первом этапе по известным зависимостям определяется долговечность в циклах наработки N_i – для выбранных режимов эксплуатации.

На втором этапе определяется дифференциальный ресурс – пробег для каждого из режимов эксплуатации в режиме номинальной загрузки по формуле

$$L_i = \frac{N_i}{l_i}, \tag{4.79}$$

где l_i – количество циклов нагружения, соответствующее 1 км пробега.

На третьем этапе вычисляется интегральный ресурс – суммарная долговечность несущей системы с учётом относительной продолжительности эксплуатации при каждом типовом режиме по формуле

$$L = 1 / \sum_{i=1}^{i=h} \left(\frac{\alpha_i}{L_i} \right), \tag{4.80}$$

где α_i – доля пробега с номинальной нагрузкой для i-го режима эксплуатации; L_i – дифференциальный ресурс; h – количество режимов эксплуатации.

Очевидно, что в формулах (4.79) и (4.80) единственная величина N_i является чисто расчётной, а величины L_i и L зависят от параметров l_i и α_i. Точность определения этих параметров в конечном итоге пропорционально определяет точность величины L. В типовых расчётных методиках рекомендовано принимать значение l_i = 250 циклов на 1 км пробега безотносительно к режиму эксплуатации. Очевидно, что от точности определения l_i зависит достоверность прогноза ресурса, а значение этой величины требует логического обоснования. С этой целью предлагается зависимость

$$l_i = \frac{10^3 \int_0^\infty f\Phi(f)df}{\upsilon \int_0^\infty \Phi(f)df} \sum_{\sigma_i=K\sigma_R}^{\sigma_i=\sigma_{\max}} \beta_i, \qquad (4.81)$$

где $\Phi(f)$ – спектральная плотность случайного процесса нагружения; υ – скорость движения по участку дороги; $\sum_{\sigma_i=K\sigma_R}^{\sigma_i=\sigma_{\max}} \beta_i$ – доля повреждающих ступеней блока нагружения, соответствующего заданному режиму эксплуатации.

В выражении (4.81) отношение интегралов является математическим ожиданием частоты приложения нагрузки, и, учитывая характер спектральных плотностей случайных процессов, в первом приближении данное отношение численно равно частоте, соответствующей максимуму спектральной плотности.

Таким образом, выражение (4.81) принимает вид

$$l_i = \frac{10^3}{\upsilon} f_i \sum_{\sigma_i=K\sigma_R}^{\sigma_i=\sigma_{max}} \beta_i, \qquad (4.82)$$

где f_i – частота, соответствующая максимуму спектральной плотности процесса динамической нагруженности исследуемой зоны несущей системы для i-го режима эксплуатации.

Для расчёта величины l_i, в условиях движения прицепа по разбитой грунтовой (режим А) и удовлетворительной грунтовой (режим В) дорогам приняты следующие значения величин, входящих в формулу (4.82): f_A = 1,8 Гц, f_B = 1,6 Гц в соответствии с видом спек-

тральных плотностей процессов нагружения зон несущих систем; $\upsilon_A = 20$ км/ч; $\upsilon_B = 25$ км/ч.

Для $K = 0{,}6$ доля повреждающих ступеней блока в заданных режимах движения А и В определяется из таблицы 4.14:

$$\left(\sum_{\sigma_i = 0{,}6\sigma_R}^{\sigma_i = \sigma_{\max}} \beta_i \right)_A = 0.6,$$

$$\left(\sum_{\sigma_i = 0{,}6\sigma_R}^{\sigma_i = \sigma_{\max}} \beta_i \right)_B = 0{,}3.$$

Отметим, что эти значения, а также значения $f_{A,B}$, $\upsilon_{A,B}$ совпадают для обоих вариантов узлов.

Таким образом,

$$l_A = \frac{10^3}{5{,}55} 1{,}8 \cdot 0{,}6 = 195 \text{ циклов/км}; \quad l_B = \frac{10^3}{6{,}94} 1{,}6 \cdot 0{,}3 = 69 \text{ циклов/км}.$$

Для назначения величины α_i, входящей в формулу (4.80), обратимся к основным (типовым) режимам эксплуатации прицепов. Напряжения, возникающие в опасных зонах при движении по асфальто-бетонным дорогам, меньше $0{,}6\sigma_R$; они не являются повреждающими и учитываются только для определения суммарной долговечности. То же относится ко всем режимам эксплуатации прицепов при движении с порожними платформами.

С учётом коэффициента использования пробега, равного для данного класса транспортных средств 0,5, формула (4.80) преобразуется к виду

$$L = \left(\frac{0{,}15}{L_A} + \frac{0{,}15}{L_B} \right)^{-1} = \frac{L_A L_B}{0{,}15(L_A + L_B)}. \qquad (4.83)$$

Таким образом, полученные зависимости позволяют перейти от оценок циклической долговечности к прогнозам ресурса в типовых условиях эксплуатации.

Результаты прогнозирующего расчёта долговечности рамы с использованием различных методических подходов сведены в таблицу 4.15.

Таблица 4.15 – Результаты прогнозирующего расчёта ресурса рамы полуприцепа ОЗТП-9554

Метод расчёта	Режим эксплуатации	Дифференциальный ресурс L_i, км	Интегральный ресурс L, км
Линейная гипотеза	А	27 915	173 704
	В	391 176	
Корректированная линейная гипотеза с расчётным значением a_p	А	–	Некорректный результат
	В	–	
Корректированная линейная гипотеза с заданным значением (a_p = 0,2)	А	5 583	34 740
	В	78 235	
Критерий Д. Генри	А	14 528	91 963
	В	273 202	
Критерий С. В. Серенсена	А	14 528	91 963
	В	273 202	
Критерий Е. К. Почтенного	А	13 236	82 644
	В	195 511	
Критерий М. Я. Шашина	А	19 246	94 772
	В	54 391	
φ-критерий	А	19 041	117 912
	В	248695	

Эксплуатационная долговечность рам. Определение оптимального метода прогнозирующего расчёта долговечности несущих систем базируется на информации об их эксплуатационной долговечности.

Были проведены исследования эксплуатационной долговечности несущих систем полуприцепов ОЗТП-9554. Оценка эксплуатационного ресурса была произведена по результатам подконтрольной эксплуатации 27 полуприцепов на сельскохозяйственных и строительных предприятиях Оренбургской области. Наблюдения осуществлялись при наработке полуприцепов до 6000 ч с интервалом дискретизации результатов наблюдения 1000 ч. Данные сведены в таблице 4.16.

Переход к значениям эксплуатационной долговечности $L_э$ (в км пробега) может быть осуществлен в соответствии с зависимостью

$$L_{Э} = \frac{\upsilon_p \sum_{i=1}^{k} (n_i T_i)}{\sum_{i=1}^{k} n_i}, \qquad (4.84)$$

где n_i – количество отказов в i-м интервале; T_i – середина i-го интервала, часы наработки; k – количество интервалов; υ_P – средняя расчётная скорость эксплуатации прицепа.

Учитывая относительные продолжительности эксплуатации тракторных поездов по асфальтобетонным дорогам (40%), УГД (30%) и РГД (30%) и значения скорости движения $\upsilon_{АД}$ = 30 км/ч, $\upsilon_{УГД}$ = 25 км/ч, $\upsilon_{РГД}$ = 20 км/ч, получим среднее значение скорости: $\overline{\upsilon_p}$ = 0,4·30 + 0,3·25 + 0,3·20 = 25,5 км/ч.

По значению υ_p и данным таблицы 4.16 по формуле (4.84) получаем долговечность несущей системы полуприцепа ОЗТП-9554 $L_{Э}$ = 123222 км.

Таблица 4.16 – Отказы несущих систем полуприцепов ОЗТП-9554

Середина интервала	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
Количество отказов	1	1	4	8	6	5	2

Ресурсные испытания рам. Для уточнения оценки эксплуатационной долговечности были проведены полигонные испытания полуприцепов ОЗТП-9554. Испытания проводились на полигонах Одесского филиала НАТИ (ОФ НАТИ) и Кубанского научно-исследовательского института по испытаниям тракторов и сельскохозяйственных машин (КубНИИТиМ).

Полигоны представляют собой искусственное сооружение – дорожное полотно замкнутой овальной формы с асфальтобетонным покрытием и размещёнными на нём в шахматном порядке металлическими препятствиями. В рассматриваемом случае испытания проводились на треке, имеющем следующую характеристику:

Длина трека, м.....510
Количество препятствий.....80
Шаг установки препятствий, м.....5
Высота препятствий, м.....0,16

Таблица 4.17 – Долговечность несущих систем полуприцепа ОЗТП-9554 в условиях полигонных испытаний

№	Долговечность		Средняя долговечность, км
	тыс. препятствий	км	
1	511,0	102 200	99 160
2	562,2	112 400	
3	414,2	82 840	

Испытания проводились при номинальной загрузке платформы полуприцепов (для ОЗТП-9554 – 10 000 кг), давлении в шинах 0,37 МПа и скорости движения по треку 10,5 км/ч. Такой режим испытаний рекомендован профессором С. С. Дмитриченко по результатам множественной корреляции нагруженности несущих систем прицепов в эксплуатации и в условиях полигонных испытаний и успешно используется более 40 лет.

При описанном режиме полигонных испытаний коэффициент перехода $K_П = 5$, т. е. переезд пяти препятствий на треке соответствует 1 км пробега в эксплуатации. Для обеспечения стабильности избранного режима испытаний на полигонах применяется система автовождения. Данные полигонных испытаний приведены в таблице 4.17.

Учитывая известные достоинства и недостатки методов подконтрольной эксплуатации и полигонных испытаний, примем среднее значение долговечности $L_Э = 111\ 191$ км.

Синтез результатов оценки долговечности. Произведенные промежуточные расчёты циклической долговечности позволяют спрогнозировать ресурс с учётом повреждающего воздействия микропрофиля дорог и оценить точность расчётных методов.

Данные для сравнительной оценки точности расчёта с использованием семи ранее изложенных методов прогнозирования долговечности приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Результаты сравнения прогнозирующего и фактического расчёта ресурса рамы полуприцепа ОЗТП-9554

№	Метод расчёта	Прогноз ресурса, км	Фактический ресурс, км	Относительная погрешность, %*
1	Линейная гипотеза	173 704	111 191	56,2
2	Корректированная линейная гипотеза (a_p = 0,2)	34 740		–68,75
3	Критерий Д. Генри	91 963		–17,29
4	Критерий С. В. Серенсена	91 963		–17,29
5	Критерий Е. К. Почтенного	82 644		–25,67
6	Критерий М. Я. Шашина	94 772		–14,76
7	φ-критерий	117 912		6,04

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Для рассмотренного объекта и условий его эксплуатации наименьшая точность характерна для методов, основанных на прямом применении линейной гипотезы суммирования повреждений (средняя относительная погрешность δ = –43%) и корректированной линейной гипотезы (средняя относительная погрешность δ = 70%). Погрешность линейной гипотезы во всех вариантах расчёта направлена не в запас долговечности, что предопределяет раннее возникновение отказов несущих систем, а следовательно, машины в целом.

Недостаточная точность метода, основанного на применении линейной гипотезы, объясняется неучётом повреждающего воздействия напряжений ниже предела выносливости.

Недостаточная точность метода, основанного на применении корректированной линейной гипотезы, показывает неадекватность применения этого метода для расчёта долговечности объектов с небольшой (до двукратной) степенью перегрузки. Погрешность корректированной линейной гипотезы направлена в значительный запас долговечности, что предопределяет чрезмерное завышение металлоемкости объекта.

Недостаточная точность метода, основанного на применении корректированной линейной гипотезы, объясняется необоснованностью параметров, учитывающих снижение предела выносливости.

2. При расчёте циклической долговечности несущей системы полуприцепа наибольшая точность (δ = –8,4%) достигнута примене-

нием расчётного метода, основанного на использовании φ-критерия. При этом погрешность направлена в запас долговечности.

3. При расчёте ресурса несущей системы полуприцепа наибольшая точность (δ = 6%) достигнута при использовании φ-критерия. При этом погрешность направлена не в запас долговечности.

В целом необходимо отметить, что применение прогнозирующих методов расчёта долговечности, основанных на использовании критериев, учитывающих закономерности снижения предела выносливости в процессе эксплуатации, позволяет достигнуть высокой точности расчёта. В нашем случае колебания суммарной относительной погрешности расчётной оценки находятся в пределах 6% < δ < 27%. Это подтверждает эффективность методов кинетической теории усталости, основанной на учёте реальных физических процессов накопления усталостных повреждений.

Модификация линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений. Представленные расчётно-экспериментальные данные по оценке долговечности позволяют предпринять попытку модификации метода расчёта долговечности, основанного на применении линейной гипотезы. Суть модификации заключается в замене реальной кривой усталости, полученной по результатам испытаний при регулярном нагружении некоторой расчётной, учитывающей изменение характеристик сопротивления усталости по мере выработки ресурса (рис. 4.37).

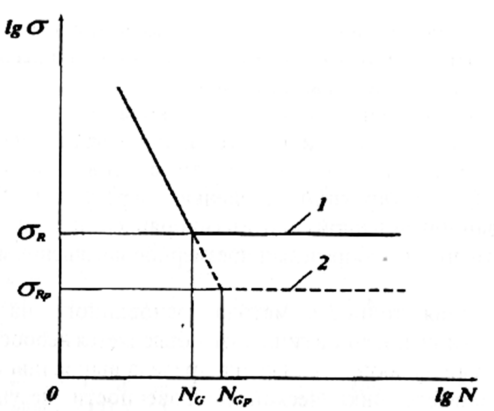


Рис. 4.37 – К определению расчётной кривой усталости

Реальная кривая усталости *1* с параметрами σ_R, N_G, m заменяется расчётной кривой 2 с параметрами σ_{Rp}, N_{Gp}, m. Вычисление величин σ_{Rp}, N_{Gp} производится по формулам:

$$\sigma_{Rp} = K\sigma_R, \tag{4.85}$$

где K – коэффициент коррекции значения предела выносливости;

$$lg\, N_{Gp} = lg\, N_G + m\, lg\left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{Rp}}\right). \tag{4.86}$$

Для теоретического обоснования значения коэффициента K воспользуемся обобщенной кривой снижения предела выносливости (рис. 4.38).

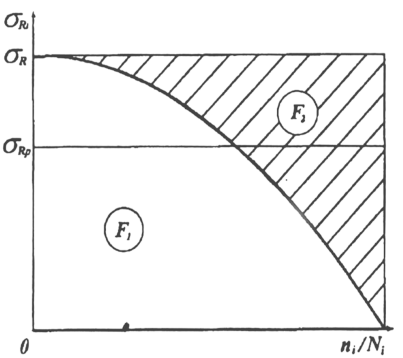


Рис. 4.38 – К определению нижней границы повреждающих напряжений

Очевидно, что отношение минимальных неразрушающих напряжений к разрушающим определится отношением площадей или средневзвешенного значения предела выносливости к его начальному значению. Таким образом:

$$K = \frac{F_1}{F_1 + F_2} = \frac{\int_0^1 \sigma_{Ri}\left(\frac{n_i}{N_i}\right) d\left(\frac{n_i}{N_i}\right)}{\sigma_R}. \tag{4.87}$$

Вычисление величины K производим по критериям Д. Генри, С. В. Серенсена и Е. К. Почтенного, так как использование этих кри-

териев с достаточной точностью дает расчётную оценку в запас долговечности, а интеграл в числителе выражения (5.76) берется в явном виде:

для критерия Д. Генри:

$$K=\frac{\int\limits_0^1 \sigma \frac{1-\frac{n_i}{N_i}}{\frac{\sigma}{\sigma_R}-\frac{n_i}{N_i}} d\left(\frac{n_i}{N_i}\right)}{\sigma_R}=\frac{\sigma\left(\frac{\sigma}{\sigma_R}-1\right)\ln\left|\frac{\frac{\sigma}{\sigma_R}}{\frac{\sigma}{\sigma_R}-1}\right|}{\sigma_R}; \qquad (4.88)$$

для критерия С. В. Серенсена:

$$K=1-\int\limits_0^1 \left(\frac{n_i}{N_i}\right)\left(\frac{\sigma}{\sigma_R}-1\right)\frac{1}{\frac{\sigma}{\sigma_R}-\left(\frac{n_i}{N_i}\right)^2} d\left(\frac{n_i}{N_i}\right)=1+\frac{\frac{\sigma}{\sigma_R}-1}{2}\ln\left|\frac{1-\frac{\sigma}{\sigma_R}}{\frac{\sigma}{\sigma_R}}\right|; \qquad (4.89)$$

для критерия Е. К. Почтенного:

$$K=\int\limits_0^1\left(1-\frac{n_i}{N_i}\right)^{1/m} d\left(\frac{n_i}{N_i}\right)=\frac{m}{m+1}. \qquad (4.90)$$

Подставляя в полученные выражения численные значения параметров, получим значения K. Результаты вычислений сведены в таблицу 4.19.

С достаточной точностью можно принять $K = 0{,}6–0{,}75$.

По методике, изложенной выше (эффективность методов расчёта долговечности по критерию усталости), произведён расчёт долговечности узлов с использованием линейной гипотезы и расчётных кривых усталости. Результаты расчёта сведены в таблицу 4.20.

Таблица 4.19 – Результаты вычислений коэффициента K

Критерии	Режим	
	A	B
Д. Генри	0,598	0,645
С. В. Серенсена	0,634	0,691
В. К. Почтенного	0,757	0,757

Для рассматриваемых конструктивных вариантов применением модифицированной линейной гипотезы с использованием расчётных кривых усталости можно достигать высокой точности прогнозирующего расчёта долговечности. Кроме того, положительным свойством этого метода является направленность погрешности, как правило, в запас долговечности.

Таблица 4.20 – Результаты расчёта долговечности узлов на основе модификаций линейной гипотезы

№	K	Режим	N_i, цикл	L_i, км	L, км
1	0,6	A	2 455 403	12 590	$\frac{76186}{-31.4}$
		B	8 543 604	123 820	
2	0,7	A	3 94 798	16 894	$\frac{103798}{-6.6}$
		B	13 704 562	198 616	

* В знаменателе дана погрешность расчёта (%) относительно эксплутационной долговечности. Знак «–» свидетельствует о том, что погрешность направлена в запас долговечности.

Отметим, что при K = 0,7 расчётный предел выносливости σ_{Rp} = 48,4 МПа. Расчётные абсциссы точек перелома левой ветви кривой усталости $N_{Gp} = 3{,}7 \cdot 10^6$ циклов.

Таким образом, для рассматриваемых конструкций узлов следует принимать K = 0,7. Для деталей и узлов другого функционального назначения определение величины K требует проведения дополнительных исследований.

Рассмотренная методика может быть успешно применена для прогнозирующего расчёта усталостной долговечности для большинства машиностроительных конструкций с учётом особенностей формирования их эксплуатационного нагружения.

4.4. Старение

Старение происходит в материалах с повышенным уровнем внутренней энергии и сопровождается изменением физико-химических и механических свойств и структуры материалов при эксплуатации и длительном хранении.

Старение обычно рассматривают как фактор ограничения продолжительности жизни биологических объектов. Для них старение означает всю совокупность необратимых изменений, происходящих за определенный промежуток времени в жизненно важных органах. Борьба со старостью и стремление достичь как можно большей продолжительности жизни важны не только для человека. Для материалов в силу действия целого ряда технико-экономических факторов так же целенаправленно изыскивают способы сохранения их первоначальных свойств, а следовательно, повышения или поддержания на неизменном уровне всех первоначальных комплексных показателей надёжности – безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости.

В материаловедении используют научный аппарат анализа процессов старения, практически без изменений заимствованный из биологии. Однако строение машиностроительных материалов значительно отличается от строения живой материи. Корректные сравнения с ней допустимо осторожно распространить на полимерные материалы.

Из-за нормативной неопределённости термина «старение» он зачастую трактуется произвольно: в некоторых литературных источниках им подменяется ключевое понятие надёжности – работоспособность. В техническом лексиконе этимология понятия «старение» означает зависящие от времени изменения свойств материала, происходящие в результате действия как многочисленных эксплуатационных факторов, так и единственного фактора времени. Эти изменения ограничивают сферу применения материалов, хотя речь идет, как правило, о весьма медленно протекающих процессах.

Оптимальными были бы такие материалы, у которых, несмотря на всю совокупность воздействий, все определяющие характеристики сохранялись в области их исходных значений. Однако создание таких материалов связано с большими техническими проблемами или экономически нецелесообразно для большинства конструкций в силу практики применения концепции ограниченной надёжности. Поэтому необходимо использовать материалы, у которых отрицательные последствия процессов старения проявляются поздно (за пределами назначенного ресурса конструкции) или слабо выражены.

Не каждый материал в одинаковой степени чувствителен к процессам старения. В зависимости от строения материала, технологий его производства и последующей обработки деталей, изготовленных из него, в процессе эксплуатации возникают новые количественные и

качественные характеристики, определяющие изменение свойств материала в зависимости от времени. Поскольку количество таких свойств весьма велико, необходимо по предварительно назначенным показателям качества, в первую очередь надёжности изделия, установить определяющие свойства материалов деталей, в том числе их чувствительность к старению. При этом, как правило, граничными условиями являются показатели безотказности и долговечности конструкции; с ними и соотносят количественные показатели допускаемых изменений свойств материалов. Решение этой проблемы является одной из предпосылок экономного использования материалов не в ущерб показателям качества и надёжности. Если же изменение свойств материала при старении неизвестно, приходится применять большие коэффициенты запаса, т. е. создавать дополнительную избыточность конструкции, что в итоге скажется на её технико-экономических показателях. Это же можно сказать и применительно к материалам, свойства которых в процессе старения существенно изменяются. В современном материаловедении основные усилия направлены на поиск методов, направленных на прогнозирование последствий старения, а также технологий стабилизации свойств материалов во времени в условиях воздействий эксплуатационных факторов, характерных для конкретных изделий.

В настоящем разделе мы ограничимся характеристиками процессов старения и методами их замедления применительно к материалам, наиболее широко применяющимся в современных конструкциях и в значительной мере определяющим их показатели надёжности:

– металлам и сплавам;
– полимерным материалам;
– резинотехническим изделиям;
– электроизоляционным материалам.

Старение металлов и сплавов

Старение металлов и сплавов – это изменение их механических, физических и химических свойств, обусловленное термодинамической неравновесностью исходного состояния и постепенным приближением структуры к равновесному состоянию в условиях диффузной подвижности атомов. В чистых металлах неравномерность исходной структуры обуславливается избыточной (для низких температур) концентрацией вакансий и другими дефектами кристаллической решетки, а в сплавах и металлах технической чистоты, содер-

жащих определенные примеси, – сохранением пересыщенных твердых растворов.

Старение приводит к увеличению твердости и прочности при одновременном снижении пластичности и ударной вязкости. При быстром охлаждении от высоких температур (после кристаллизации, при закалке, горячей пластической деформации и др.) металлы и сплавы полностью или частично сохраняют кристаллическую структуру, характерную для высокотемпературного состояния. В чистых металлах неравномерность этой структуры состоит в избыточной (для низких температур) концентрации вакансий и наличии других дефектов кристаллической структуры. В сплавах неравновесность структуры может быть связана с сохранением фаз, неустойчивых при низких температурах. Наиболее важно старение сплавов, обусловленное процессами распада пересыщенного твёрдого раствора. Состояние пересыщения твёрдого раствора возникает после охлаждения сплавов от высоких температур, поскольку обычно с повышением температуры растворимость примесей (или специально вводимых легирующих элементов) возрастает.

Имеется большая номенклатура сплавов, для которых старение проводится как специальная операция термической обработки и обеспечивает получение комплекса важных механических или физических свойств. Старение, или «дисперсионное твердение», – основной способ упрочняющей термической обработки сплавов на основе алюминия, магния, меди и никеля. Кроме высокой прочности, стареющие сплавы могут приобретать и другие ценные свойства, например высокую коэрцитивную силу.

При достаточно большой степени пересыщения твёрдый раствор оказывается полностью нестабильным и дальнейшее изменение его структуры идёт во всём объёме материала с образованием на первой стадии неоднородного твёрдого раствора с непрерывно меняющимся составом, а затем периодически расположенных частиц с чёткими границами раздела. Распад такого типа называется спинодальным и наблюдается в ряде технически важных сплавов (например, сплавы для постоянных магнитов). Более общим для стареющих сплавов является метастабильное состояние твёрдого раствора, распад которого должен идти путём образования и роста зародышей новой фазы, а процесс зарождения требует преодоления энергетического барьера. Этот барьер оказывается существенно пониженным при образовании когерентных частиц, т. е. частиц, у которых кристаллическая решётка

упруго сопряжена с решёткой исходного твёрдого раствора. При сравнительно низких температурах распад твёрдых растворов часто останавливается на стадии образования зон – весьма дисперсных областей, обогащенных избыточным компонентом и сохраняющих кристаллическую структуру исходного раствора. Образование зон характерно для так называемого естественного старения, которое протекает при комнатных температурах в случае сплавов на основе алюминия, а также низкоуглеродистой стали, где имеется твёрдый раствор, пересыщенный углеродом или азотом.

Понятию *естественное старение* противопоставляется *искусственное старение*, которое, например, для алюминиевых сплавов (традиционных материалов, упрочняемых старением) проводится при температурах свыше 100°С. Применительно к стали искусственное старение возникает тогда, когда быстро охлажденную сталь снова нагревают до значительных температур, и уже через несколько минут можно наблюдать реальное проявление эффекта старения. Этот метод называют в техническом лексиконе *закалочным старением*. В повседневной практике возникновению таких зависящих от температуры процессов выделения азота и углерода у нелегированных сталей способствует, например, зонный нагрев при сварке. Ещё одним проявлением старения является так называемая синехрупкость, или синеломкость (названия произошли от цвета поверхностей разлома), сталей, появляющаяся, когда процессы формования ведутся в температурном интервале от 250 до 350°С.

При распаде твёрдых растворов в условиях высокой концентрации дефектов кристаллической структуры (дислокаций и др.), которые создаются предварительной сильной холодной деформацией, получают особенно высокие значения прочности. Процессы распада твёрдых растворов могут приводить и к нежелательным изменениям свойств сплавов, например, к снижению пластичности и охрупчиванию низкоуглеродистой стали, к увеличению коэрцитивной силы и потерь на перемагничивание электротехнической стали.

Некоторые сплавы склонны к *деформационному старению*. Сравнительно слабая холодная пластическая деформация, сама по себе незначительно изменяющая свойства материала, существенно ускоряет процессы размежевания компонентов твёрдого раствора, которые приводят к образованию сегрегатов (а затем выделений) возле дислокаций. Этот суммарный эффект деформации и старения – деформационное старение – резко ухудшает показатели вязкости и пла-

стичности сплавов, что особенно нежелательно для материалов, подвергаемых глубокой штамповке (например, листовая сталь для автомобилестроения). В этом случае операциями легирования и термической обработки можно существенно снизить вредные эффекты старения.

В принципе старение применимо к любому сплаву, в котором имеется пересыщенный твердый раствор. Такой раствор стремится к самопроизвольному распаду – выделению из него избытка растворенного компонента. Процесс выщелачивания является типичным диффузионным превращением, ускоряющимся с ростом температуры.

Режим старения выбирают, ориентируясь на достижение максимальной прочности (жаропрочности) или оптимального сочетания прочности, пластичности и коррозионной стойкости. Если при старении в условиях максимальной деформации (полное старение) пластичность оказывается недопустимо низкой, то реализуют неполное старение, при котором потеря возможного прироста прочности компенсируется меньшим снижением пластичности.

Старение сдвигает участок резкого возрастания ударной вязкости в область более высоких температур. Очень важно «сдвинуть» этот участок в область как можно более низких температур. При этом необходимо отметить, что у состарившихся материалов меньше и сами значения ударной вязкости.

Конструктору подобные результаты говорят о том, что применение материала следует ограничить. Материалы с небольшой вязкостью при ударных нагрузках, при многоосных напряжениях и при низких температурах склонны к хрупкому поведению, следовательно, конструкция может внезапно отказать без проявления предварительных признаков. При достаточной пластичности материал может легко изменять свою форму, деформироваться, снимая или выравнивая при этом в определенном объёме критические напряжения (релаксация напряжений).

Сталь, применяемая в ответственных конструкциях, должна обладать высокой устойчивостью к старению, то есть и при холодном формовании, и при длительной эксплуатации, особенно при повышенных температурах, её вязкость должна сохраняться. Напрашивается вывод, что применение нелегированных малоуглеродистых сталей в общем случае нежелательно. Однако такие стали сегодня являются основной продукцией чёрной металлургии: на их производство идет меньше энергии, общее количество товарной прокатной стали

по этой причине возрастает, и нелегированные малоуглеродистые стали применяют во всех случаях, где они в состоянии противостоять реальным внешним воздействиям.

Чтобы эффективно применять подобные стали, конструкторы и технологи должны отчётливо представлять области их рационального эксплуатационного применения и поведения в условиях технологических переделов, в первую очередь в условиях экстремальных воздействий на материал – холодной формовки и сварки. Только при этих условиях становится возможным рациональное использование склонных к старению нелегированных и некоторых низколегированных сталей при сохранении показателей надёжности конструкции в допустимых пределах.

Весьма эффективным методом борьбы со старением сталей является восстановление алюминием. Азот, который в процессе старения вызывает выделение хрупкого нитрида железа, связывается алюминием в неопасный нитрид алюминия. Таким образом получают так называемые *нестареющие стали*, которые даже при длительной эксплуатации лишь незначительно снижают свою вязкость по сравнению с исходным состоянием.

Дополнительной возможностью существенного улучшения поведения таких сталей при старении является специальная термообработка локальных зон конструкции. Технология основана на том, что хрупкость материала зависит не только от количества, но и от распределения в его объёме нитрида и карбида железа. Сложившееся распределение можно скорректировать путём дополнительной термообработки: при специальном прокаливании выделившиеся соединения вновь переходят в раствор и проникают в зерна. Эта весьма эффективная технология восстановления потенциала работоспособности по критерию старения может быть успешно использована во время капитального ремонта машины.

Старение полимерных материалов

В современных конструкциях машин неуклонно возрастает доля деталей, изготовленных из полимерных материалов, и если в недалёком прошлом из них изготавливали в основном малоответственные и декоративные детали, то сегодня полимеры и композиты широко используются для изготовления тяжелонагруженных деталей и узлов, которые подвергаются широкому спектру эксплуатационных воздействий, имеющих различную физико-механическую природу.

Опыт свидетельствует, что из всех видов внешних воздействий старению полимеров более других способствует ультрафиолетовое излучение, ускоряющее фотохимические реакции и окислительные процессы в целом.

Скорость протекания процессов старения решающим образом определяют эксплуатационные факторы – механические воздействия, тепловые, радиоактивные, электрические и магнитные излучения, химические и биологические процессы.

Известно, что показатели надёжности деталей, изготовленных из полимерных материалов, по критерию старения в большей степени зависят от температуры, чем, например, те же показатели применительно к металлам и сплавам. При этом необходимо отметить, что продолжительное воздействие высоких температур приводит к необратимым изменениям большинства свойств полимерных материалов. В таком случае говорят о *тепловом старении*.

Значительное влияние на показатели надёжности полимерных материалов по критерию старения оказывают длительные механические нагрузки. Молекулярно-структурное строение большинства пластмасс обуславливает явления релаксации напряжений: в материале под действием постоянной нагрузки начинают проявляться процессы ползучести, при которых относительное удлинение увеличивается со временем без приложения дополнительной нагрузки. Скорость процесса старения полимерных материалов можно косвенно оценить путём разгрузки образца и измерения остаточных пластических деформаций. Важнейшим условием эффективного использования полимерных материалов является определение и назначение допускаемых напряжений растяжения. Недостаточность таких данных во многом объясняет известную осторожность в применении пластмасс для изготовления деталей долговременно нагруженных конструкций.

Современное материаловедение изыскивает методы и средства, способствующие сохранению начальных свойств полимерных материалов, что в первую очередь связано с обеспечением показателей безотказности и долговечности. Комплекс этих мер называют стабилизацией полимерных материалов. Они охватывают обширную область исследований, поскольку оптимальное применение деталей из полимеров определяется в конечном итоге их поведением при старении.

Например, применяемые на открытом воздухе изделия из полимерных материалов стабилизируют относительно снижения вредного

воздействия ультрафиолетового излучения, применяя так называемые УФ-стабилизаторы, которые превращают опасное коротковолновое ультрафиолетовое излучение в безвредное длинноволновое инфракрасное. В качестве таких стабилизаторов применяют ненасыщенные полиэфирные смолы, добавки которых в количестве около 0,5% уже достаточны для стабилизации материала. Однако только УФ-стабилизация не обеспечивает полной защиты, поэтому её обычно дополняют применением антиоксидантов, которые подавляют окислительные процессы.

Применяя процессы стабилизации полимерных материалов, не следует забывать, что они одновременно являются основной причиной трудностей, связанных с утилизацией изделий из пластмасс. Например, при сжигании стабилизированных пластмасс образуются вредные продукты пиролиза, недопустимо загрязняющие атмосферу.

Чтобы оценить функциональную надёжность изделия с приемлемой точностью, необходимо найти количественную зависимость для оценки качественных последствий старения. Её можно получить путём испытаний естественно состарившихся материалов путём определения изменений свойств материала при фиксированной наработке от исходного состояния. Однако такая методика в большинстве случаев неприемлема, поскольку эксплуатационные периоды весьма продолжительны, и материал медленно меняет свои свойства. Поэтому сегодня разработаны и апробированы технологии ускоренного старения пластмасс, которое называют также *искусственным старением*.

Предполагается, что результаты лабораторного моделирования старения адекватно отражают процессы естественного старения. И хотя в действительности задача искусственного старения решена лишь частично, уже сегодня лабораторные опыты дают ценную информацию для разработки новых материалов. Использование технологий искусственного старения позволяет осуществлять сравнительный анализ перспектив применения различных полимерных материалов и создаёт предпосылки для разработки методов анализа свойств и потребительной стоимости и их использования для выбора оптимального материала.

Старение резинотехнических изделий

При хранении каучуков, а также при хранении и эксплуатации резинотехнических изделий (РТИ) происходит неизбежный процесс старения, приводящий к ухудшению их свойств. В результате старе-

ния резин снижается прочность при растяжении, эластичность и относительное удлинение, повышаются гистерезисные потери и твердость, уменьшается сопротивление изнашиванию, изменяются пластичность, вязкость, а также растворимость невулканизированного каучука. В результате старения значительно снижается долговечность РТИ, поэтому повышение стойкости резины к старению имеет решающее значение для увеличения показателей надёжности РТИ. Повреждающие процессы, действующие на РТИ, обуславливают следующие виды старения:

– тепловое старение (термическое, термоокислительное) в результате окисления, активированного теплом;

– усталостное старение, вызванное эксплуатацией РТИ в условиях переменных механических воздействий и сопровождающих их окислительных процессов, активизированных механическим воздействием;

– окислительное старение, активированное присутствием поливалентных металлов и их соединений;

– световое старение, происходящее в результате окисления, активизированного ультрафиолетовым излучением;

– озонное старение;

– радиационное старение, происходящее в результате воздействия ионизирующих излучений.

Стойкость РТИ к старению зависит от ряда факторов, важнейшими из которых являются:

– вид и технология изготовления каучука;

– свойства содержащихся в резине противостарительных присадок (противостарителей) и наполнителей;

– вид вулканизирующих веществ и ускорителей вулканизации, от которых зависит структура и устойчивость сульфидных связей, возникающих при вулканизации;

– степень вулканизации;

– показатели растворимости и скорости диффузии кислорода в каучуке;

– соотношение между объёмом и площадью поверхности резинового изделия.

Наибольшей стойкостью к старению и окислению характеризуются полярные каучуки – бутадиен-нитрильные, хлоропреновые и др. Неполярные каучуки менее стойки к старению. Их сопротивление старению определяется главным образом особенностями молекуляр-

ной структуры, положением двойных связей и их количеством в основной цепи.

Для РТИ, использующихся в конструкциях большинства стационарных и мобильных машин, процессы старения во многих случаях формируют термоокислительные процессы и озонирование. Поэтому здесь данные процессы рассмотрены подробнее.

Тепловое старение – результат одновременного воздействия на материал тепла и кислорода. Окислительные процессы являются главной причиной теплового старения в воздушной среде. Большинство ингредиентов в той или иной степени влияют на эти процессы. Технический углерод и другие наполнители абсорбируют противостарители на своей поверхности, уменьшают их концентрацию в каучуке и, следовательно, ускоряют старение. Сильно окисленные сажи могут быть катализаторами окисления резин. Малоокисленные (печные, термические) сажи, как правило, замедляют окисление каучуков. При тепловом старении резин, которое протекает при повышенных температурах, необратимо изменяются практически все основные физико-механические свойства. Изменение этих свойств зависит от соотношения процессов структурирования и деструкции. При тепловом старении большинства резин на основе синтетических каучуков преимущественно происходит структурирование, что сопровождается снижением эластичности и повышением жесткости. При тепловом старении резин из натурального и синтетического изопренового каучука и бутилкаучука в большей мере развиваются деструктивные процессы, приводящие к релаксации напряжений и повышению остаточных деформаций при постоянстве внешних нагрузок.

Отношение наполнителя к окислению будет зависеть от его природы, от типа ингибиторов, введенных в резину, и от характера вулканизационных связей. Ускорители вулканизации, как и продукты их превращения, остающиеся в резинах (меркаптаны, карбонаты и др.), могут участвовать в окислительных процессах и в определённой степени способствовать защите РТИ от старения.

Озонное старение обусловлено повреждающим воздействием озона, который оказывает заметное, а зачастую решающее влияние на интенсивность старения резин даже в незначительной концентрации. Это обнаруживается уже в процессе хранения и перевозки резиновых изделий. Если при этом резина находится в растянутом состоянии, то на поверхности её возникают трещины, разрастание которых может привести к разрушению. Озон присоединяется к каучуку по двойным

связям с образованием озонидов, распад которых приводит к разрыву макромолекул и сопровождается образованием трещин на поверхности растянутых резин. Кроме того, при озонировании одновременно развиваются окислительные процессы, способствующие разрастанию трещин. Скорость озонного старения возрастает при увеличении деформации, концентрации озона, повышении температуры и воздействии света. Понижение температуры приводит к резкому замедлению данного вида старения.

Сопротивление резин озонному старению обуславливается, главным образом, химическим составом каучука. Резины на основе различных каучуков по озоностойкости можно разделить на 4 группы:

– особо стойкие резины (фторкаучуки, СКЭП);

– стойкие резины (бутилкаучук);

– умеренно стойкие резины, не растрескивающиеся при действии атмосферных концентраций озона в течение нескольких месяцев и устойчивые более 1 ч к концентрации озона около 0,001% (на основе хлоропренового каучука без защитных добавок и резин на основе непредельных каучуков с защитными добавками);

– нестойкие резины.

При защите от озонного старения наиболее эффективно совместное применение антиозонантов и воскообразных веществ. К антиозонантам химического действия относятся N-замещённые ароматические амины и производные дигидрохинолина. Антиозонанты на поверхности резины вступают в реакцию с озоном с большой скоростью, значительно превосходящей скорость взаимодействия озона с каучуком. В результате этого процесса интенсивность озонного старения существенно снижается.

Наиболее эффективными противостарителями и антиозонантами для защиты резин от теплового и озонного старений являются вторичные ароматические диамины. В отечественной и зарубежной практике производства РТИ и шин широкое распространение получили противостарители, применяемые в виде высокомолекулярных паст на основе комбинаций двух противостарителей – диафена ФП и диафена ФФ с поливинилхлоридом в качестве дисперсионной среды. Изменяя концентрацию ПВХ и противостарителей, можно получить пасты, пригодные для защиты резин от наиболее повреждающих видов старения – термоокислительного и озонного.

Старение электроизоляционных материалов

В процессе эксплуатации на изоляцию электрических машин, аппаратов, проводников и устройств коммутации воздействуют электрические, механические и тепловые нагрузки, вызывающие постепенное ухудшение свойств изоляции, связанных с уменьшением её сопротивления, ростом диэлектрических потерь, снижением механической прочности. Накопление деградационных отказов и вызванное этими процессами снижение эксплуатационных свойств называют старением изоляции. Эти изменения носят, как правило, необратимый характер и завершаются пробоем изоляции, что лимитирует долговечность электрических машин, аппаратов и других электротехнических и электронных устройств.

Различают четыре основных вида повреждающих воздействий на изоляцию, обуславливающих процессы её старения:

– электрические нагрузки, связанные с возможной ионизацией при большой напряженности электрического поля, – *электрическое старение изоляции*;

– тепловые нагрузки, приводящие к постепенному разложению или появлению трещин в изоляции, – *тепловое старение изоляции*;

– механические нагрузки, способствующие зарождению и развитию трещин в твердой изоляции, – *механическое старение*;

– проникновение влаги из окружающей среды, увлажнение изоляции и снижение её диэлектрических свойств – *гидростарение*.

Возникающие в изоляции дефекты подразделяются на *сосредоточенные* (трещины, газовые включения, эрозия, увлажнение локального объёма изоляции) и *распределённые*, охватывающие значительный объём или поверхность изоляции.

Электрическое старение твердой изоляции происходит вследствие возникновения разрядных процессов во внутренних локальных объёмах изоляции. Электрическое старение может иметь место при средней напряженности электрического поля на промежутке, много меньшей (в 5–20 раз) кратковременной электрической прочности изоляции. С увеличением напряжения темпы электрического старения возрастают. Основной причиной электрического старения внутренней изоляции являются *частичные разряды*, то есть такие разрядные процессы в изоляции, которые распространяются лишь на часть изоляционного промежутка. Они возникают в ослабленных местах изоляции: в газовых включениях, в местах резкого усиления напря-

женности электрического поля. Наибольшую опасность представляют частичные разряды в газовых включениях, так как они возникают при меньших напряжениях, чем разряды в жидких или твёрдых компонентах твёрдой изоляции. Закономерности развития частичных разрядов можно проиллюстрировать схемой замещения, изображенной на рисунке 4.39, где изображён локальный объём твёрдой изоляции с газовым включением и схема замещения изоляции.

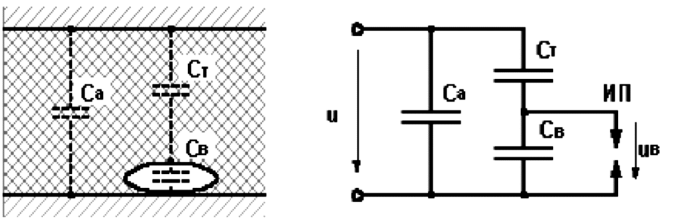


Рис. 4.39 – Схема замещения: развитие частичных разрядов в газовом включении

Здесь $C_в$ – емкость газового включения, $C_т$ – емкость части изоляции, включенной последовательно с газовым включением, $C_а$ – емкость оставшегося массива изоляции.

При подаче на изоляцию переменного напряжения на воздушном включении также будет изменяющееся во времени напряжение, определяемое емкостным делителем по формуле

$$u_B = u\frac{C_T}{C_T + C_B}, \qquad (4.91)$$

и при достижении напряжением $u_в$ значения *напряжения пробоя* $U_{в\text{-}пр}$ происходит пробой газового включения с резким снижением напряжения на нем до уровня *напряжения гашения* $U_{в\text{-}г}$, которое меньше пробивного напряжения. После этого, если напряжение на всей изоляции продолжает возрастать, то вновь начинается рост напряжения, и на газовом включении и может произойти новый пробой, т. е. в газовом включении происходят многократные пробои промежутка.

Под действием частичных разрядов происходит постепенное разрушение микрообъёмов изоляции, размеры газового включения растут в направлении электрического поля, и этот процесс завершается полным пробоем изоляции.

Эффективным средством борьбы с частичными разрядами является пропитка изоляции. Замена воздуха жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r > 1$ увеличивает ёмкость $C_в$, снижая напряжение на воздушном включении; кроме того, электрическая прочность жидкого диэлектрика существенно больше электрической прочности газа.

Тепловое старение изоляции развивается за счёт ускорения различных химических реакций при рабочих температурах изоляции, обычно лежащих в пределах от 60 до 130°С. Химические реакции приводят к постепенному изменению структуры и свойств материалов и к ухудшению диэлектрических свойств изоляции в целом.

Для твердой изоляции наиболее характерным является постепенное снижение механической прочности в процессе теплового старения. Это приводит к повреждению изоляции под действием механических нагрузок и затем к её пробою. В жидких диэлектриках продукты разложения загрязняют изоляцию и снижают её электрическую прочность. Для органической изоляции повышение температуры на 10°С снижает её долговечность вдвое. Для комбинированных изоляций, применяемых, например, в силовых трансформаторах (твёрдая изоляция и трансформаторное масло), процессы теплового старения протекают существенно быстрее.

Механическое старение изоляции возникает при механических нагрузках на твердую изоляцию. Сущность этого вида старения заключается в том, что в напряженном материале изоляции, особенно в условиях переменных нагрузок, возникает упорядоченное движение локальных микродефектов, и за счёт этого образуются и постепенно увеличиваются в размерах микротрещины. При действии сильных электрических полей в микротрещинах возникают частичные разряды, ускоряющие разрушение изоляции.

Гидростарение изоляции обуславливается проникновением во внутренние объёмы изоляции влаги, главным образом, из окружающего воздуха. При этом происходит уменьшение сопротивления изоляции, рост диэлектрических потерь, связанный с дополнительным нагревом изоляции и ускоряющий тепловое старение изоляции. Неравномерное увлажнение, кроме того, приводит к искажению электрического поля и снижает напряжение пробоя изоляции.

Увлажнение является частично обратимым процессом, поскольку влага может быть удалена из изоляции сушкой. Однако сушка крупногабаритных конструкций требует вывода оборудования из

эксплуатации на длительное время, а в ряде случаев извлечение влаги из изоляции затруднено или невозможно, например, практически не поддается сушке изоляция кабелей, вводов и другого оборудования. Для снижения степени увлажнения применяют герметизацию конструкций, внутреннюю вентиляцию, дренажные системы и другие методы.

Кроме перечисленных основных причин, на старение изоляции может влиять много других факторов: наличие химически активных веществ, находящихся в воздухе (например, хлора, аммиака, паров кислот и щелочей), морской воды, низких температур (до –60°С в ряде районов страны), микроорганизмов и даже насекомых (в тропических странах).

Так как главной причиной, вызывающей старение изоляции, является высокая температура, она нормируется стандартами и техническими условиями.

Максимально допустимая температура изоляции может быть найдена сложением температуры максимально допустимого превышения температуры с условной температурой окружающей среды. Принято, что $\vartheta_{\text{окр.}} = 35°\text{C}$. Если температура окружающей среды выше расчётной, то превышение температуры обмотки в эксплуатации должно быть снижено, чтобы температура обмотки не превосходила максимальную допустимую, используем формулу

$$\vartheta_{\max} = \tau_{\max} + \vartheta_{окр}. \qquad (4.92)$$

Если температура окружающей среды меньше расчётной, то в эксплуатации допускается соответственно увеличивать $\tau_{\max}$, но не более чем на 10°С по сравнению с нормируемым значением. Такое ограничение обусловлено влиянием перепада температур на старение изоляции, а перепад температур по толщине изоляции пропорционален превышению температуры обмотки.

При работе машины в горных местностях, где из-за понижения атмосферного давления ухудшается теплоотдача, стандарты предусматривают некоторое уменьшение допустимых превышений температуры.

Значения $\vartheta_{\max}$, не превышающие допускаемых, обычно обеспечивают работу электрических машин в течение длительного времени – примерно 10–20 лет. Однако эти данные возможно учитывать лишь в первом приближении, а реальное рассеивание долговечности

машин может быть скорректировано и в большую, и в меньшую стороны, так как имеются существенные различия в условиях эксплуатации и технологии изготовления машин, где начальные свойства изоляции могут ухудшаться. Внесение таких поправок особенно важно при оценке показателей безотказности и долговечности эмалевых проводов, укладываемых в пазы.

Проведены многочисленные исследования по изучению влияния повышенных температур на механические свойства изоляции. Например, лакоткань помещалась на длительное время в горячее трансформаторное масло, а затем измерялась прочность на разрыв. Опыты показали, что в интервале 90–110°С при увеличении температуры на 8°С прочность на разрыв уменьшалась вдвое. Таким образом, в данном случае старение изоляции оценивалось прочностью на разрыв.

Аналогичные опыты проводились с манильской бумагой, электрокартоном и другими материалами, причем оценка механических свойств производилась не только измерением прочности на разрыв, но и по сопротивлению усталости (числу перегибов до разрушения). Эти опыты давали сходные результаты, хотя приращение температуры, при котором старение изоляции изменялось в 2 раза, колебалось в интервале 5–10°С.

К. Монтзингер на основании своих опытов и опытов других авторов предложил простое правило для определения срока службы изоляции класса *А* (бумага, пряжа, шелк): при вполне определенном неизменном приращении температуры срок службы уменьшается в 2 раза. Им же установлено, что значение этого приращения в первом приближении составляет около 8°С, поэтому предложенную К. Монтзингером эмпирическую зависимость называют *правилом восьми градусов.* В действительности приращение температуры $\Delta\vartheta$ в большинстве случаев составляет 5–10°С.

Главное значение этого правила в том, что оно указывает на характер зависимости, т. е. всегда можно утверждать, что повышение температуры на 8°С примерно в 2 раза снизит срок службы машины. Более точное определение срока службы может быть получено только из статистических данных эксплуатации изделий конкретного типа.

Правило восьми градусов не следует распространять в область низких температур. Так, при длительной температуре 90°С и ниже старение изоляции происходит в основном не из-за химических превращений, а по другим причинам, рассмотренным выше (механиче-

ское разрушение из-за вибраций, взаимного перемещения проводника и паза электромашины и т. д.).

Расчёт долговечности изоляционных материалов производится по формуле

$$D_\vartheta = A_0 2^{-\vartheta/\Delta\vartheta}, \tag{4.93}$$

где D_ϑ – срок службы при фиксированной температуре ϑ; A_0 – срок службы в годах при $\vartheta = 0°C$.

По К. Монтзингеру, $\Delta\vartheta$ = 5–10°C. В большинстве расчётов принимается ϑ = 8°C, тогда формула (4.93) принимает вид

$$D_\vartheta = A_0 2^{-\vartheta/\Delta\vartheta} = A_0 e^{-\vartheta\frac{(\ln 2)}{8}} = A_0 e^{-0{,}087\vartheta}. \tag{4.94}$$

На основании результатов лабораторных исследований и опыта эксплуатации срок службы изоляции класса А при постоянной температуре 105°C принимается равным примерно 7 годам. Тогда из (4.94) вытекает

$$A_0 = 7 \cdot 2^{105/8} = 6{,}225 \cdot 10^4. \tag{4.95}$$

Следовательно, при расчётах целесообразно применять формулу

$$D_\vartheta = 6{,}225 \cdot 10^4 e^{-0{,}087\vartheta}, \tag{4.96}$$

или, что более удобно, воспользоваться формулой (4.97) для определения срока службы в годах:

$$D_\vartheta = 7 \cdot 2^{\frac{105-\vartheta}{8}}. \tag{4.97}$$

Кратковременные перегрузки могут существенно сократить ресурс машины, так как при больших токах температура растет весьма ощутимо. Так, например, при коротком замыкании температура изоляции может достигать ~250°C. Срок службы изоляции при такой температуре составляет всего ~14 мин.

Особенно важно помнить, что выходит из строя изоляция в первую очередь там, где температура максимальна. Характер изменения долговечности изоляционных материалов в зависимости от температуры приведен на рисунке 4.40.

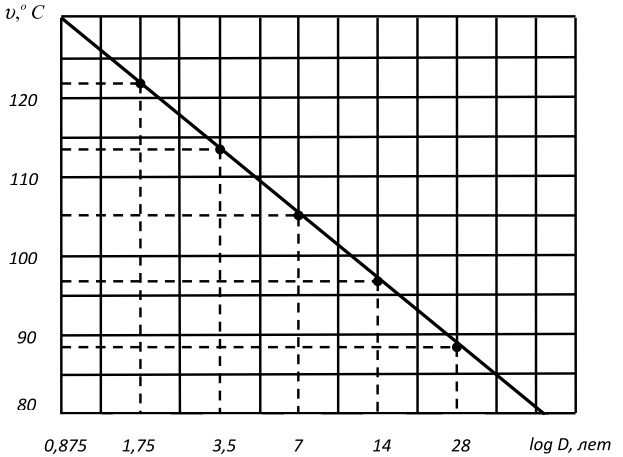


Рис. 4.40 – Зависимость срока службы изоляции от температуры

Относительная интенсивность старения изоляции (в %) определяется по формуле

$$V_1 = \left(t_1 \Big/ D_{\vartheta 1} \right) 100 = \left(100 t_1 \Big/ 7 \right) 2^{\frac{\vartheta - 105}{8}}. \qquad (4.98)$$

Если температура изменяется вследствие перегрузки, то относительная интенсивность старения (в %) определяется по формуле

$$V_1 = 100 \int_0^{t_1} \frac{dt}{D_\vartheta} = \frac{100}{7} \int_0^{t} 2^{\frac{\vartheta - 105}{8}} dt. \qquad (4.99)$$

При одинаковой средней температуре возможны существенные различия в сроках службы изоляции: неудачно сконструированная электромашина или аппарат могут иметь отдельные плохо охлаждаемые места, где температура значительно выше средней, и старение изоляции на этом участке в конечном счёте определит срок службы всей машины.

Методы контроля изоляции подразделяются на три группы:

– *неразрушающие методы контроля*, осуществляемые при напряжениях, меньших рабочих, и основанные на явлениях, возника-

ющих в слабых электрических полях (электропроводность и поляризационные явления) и связанных с пробивным напряжением изоляции;

– неразрушающие методы контроля, производимые при рабочих напряжениях, – в основном это контроль частичных разрядов, а также тепловой и ультразвуковой контроль;

– разрушающие методы контроля, связанные с использованием напряжения, повышенного по сравнению с рабочим напряжением и вызывающего ускоренное разрушение изоляции в дефектном месте; приложение повышенного напряжения не исключает появления дефекта, который может привести к пробою изоляции во время эксплуатации.

Кроме того, методы контроля подразделяют на две группы по технологическому признаку:

– электрические методы контроля;

– неэлектрические методы контроля: хроматографический анализ газовых включений, ультразвуковые методы контроля, радиоволновой метод, тепловизионный метод, оптикоэлектронный метод, рентгенографический метод.

4.5. Эрозия

Эрозионным разрушением деталей машин называют процесс изменения их размеров или повреждения поверхностей при динамическом воздействии на материал механических частиц или электрических разрядов. Механические частицы могут быть твердыми, жидкими или газообразными.

Строго говоря, эрозионные повреждающие процессы не являются самодостаточными, как, например, усталость, и могут быть рассмотрены в рамках изучения процессов изнашивания и коррозии. Однако в практике анализа надёжности эрозию принято рассматривать как самостоятельный повреждающий процесс.

В зависимости от характеристик механических частиц различают газовую, кавитационную, абразивную и электрическую эрозии. В процессе *газовой* эрозии материал разрушается под действием механических и тепловых воздействий газовых молекул, при *кавитационной* – парогазовых пузырьков и капелек жидкости, при *абразивной* – мелких частиц повышенной твердости, при *электрической* –

под действием, во-первых, энергии электрического разряда, во-вторых, сопровождающих его гальванических процессов.

Газовую эрозию можно наблюдать как следствие протекания рабочих процессов применительно к клапанам системы газораспределения, поршневым кольцам и к зеркалам цилиндров двигателей внутреннего сгорания. При газовой эрозии рабочие поверхности разрушаются, главным образом, в результате контакта с динамическим потоком раскаленных газов. Кавитационную эрозию можно наблюдать на наружной поверхности гильзы в результате воздействия потока охлаждающей жидкости, сопровождаемого вибрацией двигателя. Ей сопутствует и процесс электрохимической коррозии. В результате образования и быстрого «захлопывания» кавитационных пузырьков возникают локальные гидравлические удары большой силы – микровзрывы.

Гидроабразивной эрозии подвержены плунжерные пары, гильзы цилиндров дизельных двигателей, трубопроводы и детали, работающие в потоках воды и смазочных материалов. Интенсивность разрушения при газогидроабразивной эрозии зависит не только от энергии удара, твердости, прочности, размера и геометрии частиц в потоке жидкости или газов, но и от угла вектора скорости абразивных частиц к поверхности детали (угла атаки): она максимальна при угле атаки 30–70°.

Электроэрозионному разрушению под действием дугового или искрового разряда в результате испарения или выброса металла в виде капель (например, применительно к контактам прерывателя-распределителя) подвержены электропроводные материалы.

В зависимости от глубины воздействия на поверхность детали и специфики процесса повреждения механизм разрушения может быть также идентифицирован как химико-механическая, микроударная или термическая эрозия.

Наименьшая интенсивность поверхностного разрушения отмечается при *химико-механической форме* эрозии. Разрушение в этом случае происходит в поверхностных слоях субмикроскопической толщины в результате изнашивания трансформированных пленок вторичных структур. Вторичные структуры образуются так же, как при коррозионно-механическом изнашивании, т. е. путём пластического оттеснения тончайших поверхностных слоёв, их структурно-термической активации и последующей пассивации в результате взаимодействия с активными элементами среды. Химико-механическая

эрозия является наиболее распространенной формой повреждения деталей при их работе в низкоскоростном потоке газов, жидкостей, твердых частиц. Интенсивность эрозии невелика и стабильна по времени, если поверхность детали отполирована.

При *микроударном механизме эрозии* энергия локальных импульсных взаимодействий вызывает пластическую деформацию, структурные или фазовые превращения в микрообъёмах, соизмеримых с размерами зерна металла и отдельными структурными составляющими. Поэтому возрастает роль физико-механических характеристик границ зёрен и отдельных структурных составляющих сплавов в процессе зарождения и развития микротрещин на стадии разрушения. Этот механизм разрушения наиболее ярко проявляется при кавитации.

Термический механизм эрозии проявляется при воздействии на материал раскаленного газового потока, под действием которого ослабевают связи между частицами металла, происходит вынос частиц газовой струей. Физические механизмы и кинетика этого процесса разрушения полностью не изучены.

Для уменьшения интенсивности эрозионного разрушения деталей необходимо:

– максимально изолировать, а в отдельных случаях герметизировать узлы трения;

– тщательно восстанавливать защитные покрытия;

– особо тщательно восстанавливать демпфирующие элементы рассматриваемого механизма, чтобы сдерживать вибрацию и распространение упругих волн в деталях.

Таким образом, в процессе эксплуатации машины необходимо не только снижать интенсивность накапливания абразивных частиц на поверхности трения и увеличения зазора в сопряжениях, но и исключить действие вторичных факторов, способствующих эрозионному разрушению. В процессе технической эксплуатации основным мероприятием по снижению интенсивности эрозии является применение защитных покрытий.

4.6. Климатические факторы и показатели надёжности

На открытом воздухе эксплуатируется многие виды машин: автомобили, тракторы, подъёмно-транспортные, строительно-дорожные, сельскохозяйственные и лесозаготовительные машины, горно-транспортные машины открытых горных разработок, подвижной состав железных дорог и городского транспорта и др.

Эксплуатация машин на открытом воздухе обуславливает повышенную интенсивность неблагоприятного воздействия климатических факторов, в первую очередь низких и высоких температур воздуха, суточных и годовых амплитуд и размахов этих температур, солнечной радиации, влажности воздуха, интенсивности осадков, скорости и направления ветра. Неблагоприятные воздействия оказывают такие атмосферные явления, как метели, иней, туманы, гололед, пыльные и песчаные бури и др. В результате дополнительного повреждающего воздействия названных факторов физико-механические и химические свойства конструкционных и эксплуатационных материалов, как правило, ухудшаются. Изменение свойств используемых материалов приводит к снижению их сопротивления воздействию основных повреждающих процессов – изнашивания, коррозии, усталости, старения и эрозии и, как следствие, к снижению показателей надёжности машин и эффективности их использования (рис. 4.41).

Климатические факторы воздействуют также и на человека-оператора, и на объекты воздействия и инфраструктуры машин – разрабатываемые грунты, возделываемые поля, дороги и др. Изменение показателей надёжности человека и ухудшение свойств объектов воздействия существенным образом влияют на надёжность машин, поэтому климатическую надёжность машин следует рассматривать в системе человек – машина – объект воздействия машины. Надёжное функционирование этой системы во многом определяется надёжностью человека-оператора, которая при неблагоприятных условиях может снизиться до критических значений. Таким образом, экономическое развитие северных и южных территорий возможно при использовании здесь машин, надёжно работающих в условиях холодного и жаркого климата и оснащённых оборудованием, создающим комфортные условия для операторов и обслуживающего персонала. Применение машин, не приспособленных для работы в экстремальных климатических зонах, приводит к значительным непроизводительным затратам.

Решение проблемы обеспечения оптимальной надёжности технических и эргатических систем при их эксплуатации в различных климатических условиях требует обобщения накопленного опыта создания машин, рассчитанных на работу в различных климатических условиях.

К воздействию климатических факторов наиболее чувствительны полимерные материалы, резинотехнические изделия, электронная

аппаратура. Для таких объектов требуется проведение дополнительных исследований, связанных с разработкой индивидуальных методов защиты от влияния климатических факторов. Комплексный метод исследований климатической надёжности эргатических систем позволяет устанавливать климатические вариации физико-химических повреждающих процессов, вызывающих отказы машин, основы физиологических, антропологических и инженерно-психологических факторов, обуславливающих снижение показателей надёжности человека-оператора, и прогнозировать показатели надёжности систем при их эксплуатации в различных, в первую очередь экстремальных, климатических условиях.

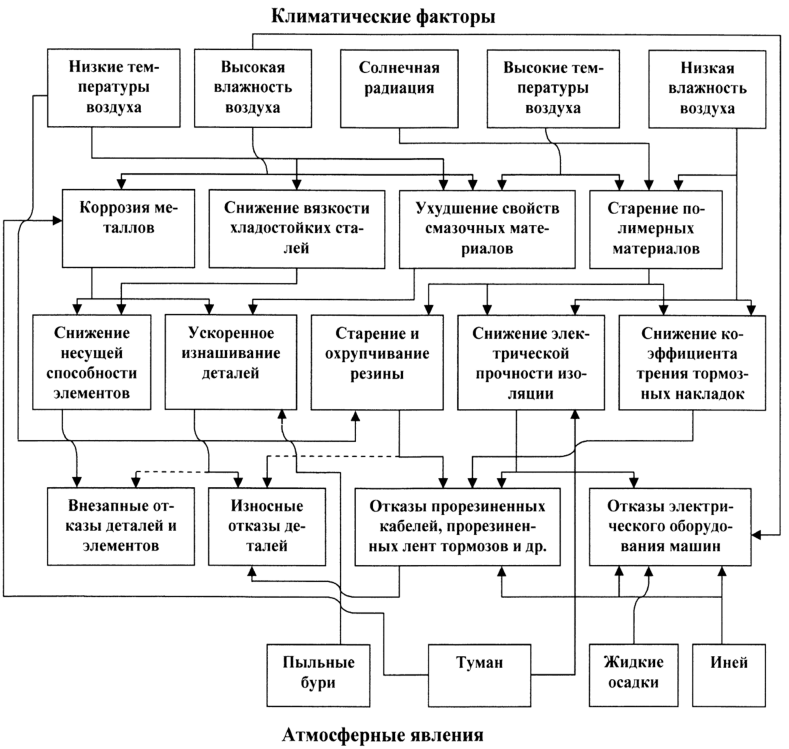


Рис. 4.41 – Схема комплексного влияния климатических факторов и атмосферных явлений на свойства материалов и надёжность машин

Характеристика климата как одного из основных факторов эксплуатации машин обусловливается следующими основными видами климатических воздействий: режима солнечной радиации, температурных колебаний, потоков атмосферного воздуха, влагооборота, физико-географических особенностей рельефа и подстилающей поверхности, изменениями климата, вызываемыми деятельностью человека – созданием крупных водохранилищ, земледелием, добычей полезных ископаемых и др. Характеристики действующих факторов во многом определяются географическим положением территории: её географической широтой, удаленностью от крупных водных акваторий и океанских течений, высотой над уровнем моря и др. Поскольку климат Земли характеризуется большим разнообразием, вся её территория по показателям климата для технических целей условно разделена на шесть макроклиматических районов, характеристика которых приведена в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Классификация и характеристика климатических районов земного шара для технических целей

Район	Характеристика
Умеренный	Территория, на которой средняя из ежегодных абсолютных максимумов температуры воздуха равна или ниже 40°С, средняя из ежегодных абсолютных минимумов температуры воздуха равна или выше –45°С
Холодный	Территория, на которой средняя из ежегодных абсолютных минимумов температуры воздуха ниже –45°С
Тропический влажный	Территория, на которой сочетание температуры воздуха 20°С или выше и относительной влажности 80% или выше наблюдается в сутки 12 ч и дольше за непрерывный период более двух месяцев в году
Тропический сухой	Территория, на которой средняя из ежегодных абсолютных максимумов температуры воздуха выше 40°С и которая не относится к макроклиматическому району с влажным тропическим климатом
Умеренно холодный морской	Акватория морей и океанов, расположенная севернее 30° северной и южнее 30° южной широты
Тропический морской	Акватория морей и океанов, расположенная между 30° северной и 30° южной широты

Макроклиматические районы холодного климата разделены на зоны арктического и субарктического климата, а между районами

тропического и умеренного климата расположены зоны субтропического климата.

На территории России климат весьма разнообразен – от субтропического на юге до арктического на севере, что определяет различную картину его качественного и количественного влияния на показатели надёжности машин.

Характерными особенностями климата России, влияющими на надёжность машин, являются низкие (до –70°С) температуры воздуха в зимние месяцы на территории Северо-Восточной Сибири (Верхоянск, Оймякон), высокие (до +50°С) температуры воздуха в летние месяцы на юге, высокая влажность воздуха в зимние месяцы на большей части территории России, высокая интенсивность ветровых потоков. Большое разнообразие климатических условий на территории России обусловило районирование её территории. При этом следует отметить, что бóльшую часть территории России занимают районы с континентальным климатом.

Континентальность климата является одной из главнейших его характеристик, оказывающих существенное влияние на показатели надёжности машин. Континентальность характеризуется годовыми размахами температуры воздуха. Чем больше эти размахи, тем выше континентальность климата. В районах высокой континентальности климата они могут доходить до 100°С (районы Якутска, Оймякона и др.). Поскольку размах является суммой амплитуд положительных и отрицательных температур воздуха, это особенно усложняет процесс создания машин, надёжно работающих и в экстремально холодных, и в экстремально жарких условиях. Континентальность климата определяется по формуле

$$\kappa = \frac{A_Г}{\varphi} \cdot 100\,\%, \qquad (4.100)$$

где $A_Г$ – годовой размах температуры воздуха; φ – географическая широта.

На большей части территории России климат характеризуется весьма высокой континентальностью – от переходного до самого континентального. Резко континентальный и самый континентальный климаты распространяются на большую (около 80%) часть территории России. Наиболее высокая континентальность климата свой-

ственна районам Якутска – Оймякона (99%), Восточной Сибири (80–90%).

На свойства конструкционных материалов и, следовательно, на показатели надёжности машин существенно влияют не все климатические факторы и атмосферные явления; влияние основных повреждающих факторов схематически показано на рисунке 4.41.

Наиболее существенно на технические устройства влияют солнечная радиация, низкие и высокие температуры воздуха, влажность воздуха, скорость ветра, туманы, метели, пыльные бури и др. Изменения свойств материалов зависят также от интенсивности и продолжительности воздействия перечисленных факторов и их наиболее неблагоприятного сочетания.

Воздействия климатических факторов вызывают определенные типичные отказы, ускоряют потоки отказов, возникающих в результате случайных перегрузок, снижают сопротивление усталости большинства материалов, ухудшают режимы трения, акцентируют отдельные структурные и детальные ошибки, допущенные при проектировании и изготовлении машин. Ухудшение эксплуатационных свойств материалов, вызванное воздействием климатических факторов, снижает наработку до наступления отказов и резко повышает интенсивность пусковых и нагрузочных отказов.

Влияние климатических факторов на свойства материалов

Низкие температуры воздуха существенно влияют на свойства конструктивных и эксплуатационных материалов и на надёжность машин (рис. 4.42). Они действуют на машины непосредственно, ухудшая основные физико-механические свойства конструкционных и эксплуатационных материалов, и косвенно, изменяя (ухудшая) условия работы машин вследствие изменения характеристик дорог, подстилающих поверхностей и грунтов, попадания снега в открытые механизмы, образования инея, наледей и др.

Главной причиной увеличения параметра потока отказов машин в холодное время года являются хрупкие разрушения металлических деталей и элементов конструкций из металлов, полимерных материалов и, в отдельных случаях, из резин. Эти разрушения – следствие перехода материала деталей из вязкого в хрупкое состояние при определенных низких температурах (возникновение низкотемпературной хрупкости материалов).

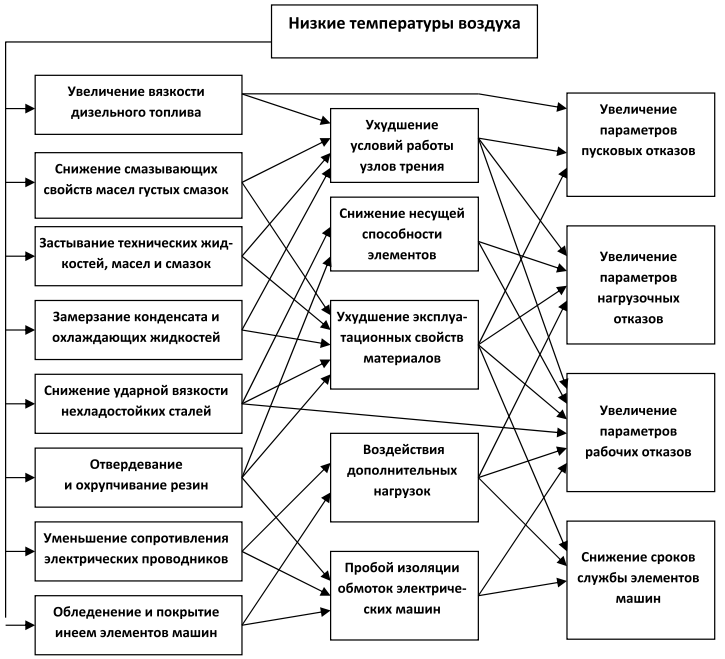


Рис. 4.42 – Общая схема влияния низких температур воздуха на свойства материалов и отказы машин

На хладноломкость материалов влияют температура охлаждения, химический состав и структура, наличие концентраторов напряжений, градиент изменения внешней нагрузки, технология производства и ряд других факторов. Для машин, работающих на открытом воздухе, значения низких температур находятся в интервале от 0 до –65°С. У многих конструкционных сталей и пластмасс температура резкого снижения вязкости (порог хладноломкости) также лежит в диапазоне этих температур.

Работа зарождения трещины зависит от наличия и вида концентрации напряжений в конструктивных элементах. Работа распространения трещин зависит от материала и показателей его вязкости и хрупкости.

При деформировании металла элементов машин обычно происходит выход определенного числа дислокаций на поверхность или задержка их внутри объёма металла. В общем случае суммарная энергия разрушения металла рассчитывается по формуле

$$E_P = E_{BT} + E_{XT}, \qquad (4.101)$$

где E_{BT} – удельная энергия, затрачиваемая на образование вязких трещин; E_{XT} – то же, для хрупких трещин.

При идеально вязком разрушении все дислокации выходят на поверхность монокристалла, и в этом случае $E_P = E_{BT}$. При идеальном хрупком разрушении все дислокации задерживаются в металле, и $E_P = E_{XT}$.

Низкие температуры воздуха, при которых металл с низкими показателями хладостойкости переходит из вязкого в хрупкое состояние или в его ударной вязкости повышается доля хрупкой составляющей, резко снижают допустимую скорость деформации. Хладноломкость металлов увеличивается с уменьшением радиуса надреза или другого концентратора напряжения в детали.

Солнечная радиация является основным фактором формирования теплового режима атмосферы и поверхности Земли. Поэтому влияние на свойства материалов низких и высоких температур воздуха определяется в конечном счёте влиянием солнечной радиации на тепловой режим воздуха. Действие солнечной радиации на элементы машин вызывает повышение температуры как самих элементов, так и внутренних объёмов воздуха (кузовов, кабин управления, двигательных отсеков, корпусов редукторов и др.). В полимерных материалах, используемых в конструкциях машин, под действием солнечной радиации возникают сложные процессы, вызывающие старение этих материалов.

Интенсивность солнечной радиации определяется количеством теплоты в джоулях, приходящимся на 1 см^2 абсолютно черной поверхности за 1 мин, перпендикулярной к лучам. Под абсолютно черной поверхностью понимают поверхность, которая поглощает всю солнечную радиацию.

Количество энергии E, излучаемое абсолютно черной поверхностью любого объекта, определяется согласно закону Стефана – Больцмана, по формуле

$$E = \sigma \cdot F \cdot T^4, \qquad (4.102)$$

где σ – коэффициент пропорциональности или постоянная излучения; F – поверхность объекта; T – абсолютная температура излучающей поверхности.

Действие закона Стефана – Больцмана с незначительными погрешностями может быть распространено и на большинство естественных («серых») поверхностей. При более точном учёте излучательной способности естественных поверхностей в формулу (4.102) вводят относительный коэффициент излучения δ, и тогда она приобретает вид

$$E = \delta \cdot \sigma \cdot F \cdot T^4. \qquad (4.103)$$

Скорость нагрева тел зависит от интенсивности солнечной радиации, температуры окружающей среды и отражательной способности поверхности тела. Отражательная способность в свою очередь зависит от цвета и шероховатости (гладкости) поверхности: чем более гладкую поверхность имеет тело, тем больше лучей оно отражает.

Влияние влажности воздуха, росы, тумана обуславливается процентным содержанием влаги в воздухе (табл. 4.22). Высокий уровень влажности (более 90%) приводит к снижению служебных свойств материалов, поскольку влага проникает внутрь этих материалов и образует на их поверхности плёнки жидкости. При малом содержании влаги в воздухе (ниже 50%) влага, содержащаяся в материалах, испаряется в воздух, что также изменяет свойства материалов: они становятся хрупкими, в них интенсивнее развиваются трещины.

Влагу из воздуха наиболее активно поглощают гигроскопические материалы, например изоляционные, изготовленные на основе хлопка и бумаги. Влага может проникать внутрь материала при поглощении её материалом (капиллярная конденсация) или проникновении в структуру (межмолекулярные промежутки) полимеров, а также через трещины и крупные поры. Насыщение влагой таких материалов, как резина, и некоторых других происходит путём осмоса.

Таблица 4.22 – Характеристика влияния влажности воздуха на свойства материалов и условия работы оборудования машин

Высокая влажность	Низкая влажность
Коррозия металлов	Образование трещин и микроразрушений изоляционных материалов
Обводнение жидких минеральных масел, технических жидкостей и топлива	–

Продолжение табл. 4.22

Высокая влажность	Низкая влажность
Обводнение консистентных смазок с образованием эмульсии	Загустевание консистентных смазок
Снижение объёмного сопротивления изоляционных материалов	Высыхание уплотняющих материалов
Снижение поверхностного сопротивления изоляторов	Коробление деталей из пластмасс
Повышение диэлектрической проницаемости воздуха	–
Рост плесени	–

Скорость проникания влаги в материал увеличивается при повышении температуры окружающего воздуха. Влага, поглощенная материалом или проникшая в него другими путями, резко снижает его объёмное сопротивление. Зависимость удельной электропроводности диэлектриков от их влажности определяется уравнением

$$\sigma_{Э} = \sigma_{Э0} \cdot e^{\chi(Z - Z_0)}, \qquad (4.104)$$

где $\sigma_{Э0}$ – удельная электропроводимость при t = 0°С; Z – абсолютная влажность материала; x – коэффициент, зависящий от свойств материала.

Атмосферное давление существенно влияет на рабочие характеристики двигателей внутреннего сгорания, турбокомпрессоров, трансформаторов, электрических устройств, у которых в качестве изолирующей среды используется воздух и др. Так, при значительном уменьшении атмосферного давления воздуха уменьшается напряжение пробоя воздушного промежутка между проводниками. Вероятность пробоя увеличивается на 30% при снижении давления с 101,3 до 70,9 кПа (с 1 до 0,7 атм), что отвечает подъему на высоту около 3000 м над уровнем моря.

Атмосферное давление значительно изменяется с изменением высоты местности над уровнем моря. Поэтому наибольшее влияние атмосферное давление оказывает на машины при работе в высокогорных условиях.

Пыльные и песчаные бури увеличивают содержание в воздухе твердых абразивных частиц пыли и песка до 1500 мг/м^3 и более. Перемещаясь и контактируя с открытыми поверхностями деталей (резиной, изоляционными материалами и др.), эти частицы являются причиной развития эрозионных повреждений. Попадая в узлы трения

скольжения, твердые частицы пыли и песка многократно увеличивают скорости абразивного изнашивания контактирующих поверхностей. В подшипниках пыль и песок помимо увеличения скорости изнашивания элементов могут вызывать заклинивание.

Оседая на обмотках электрических машин и аппаратов, пыль уменьшает их теплоотдачу в воздух, что приводит к перегреву обмоток. Повышение температуры изоляции обмоток резко уменьшает показатели безотказности и долговечности. Пыль, содержащая частицы угля и металлов, при оседании на изоляторах, коллекторах электрических машин и на открытых токоведущих частях машин может вызывать короткие замыкания на корпус или между фазами.

При пыльных и песчаных бурях частицы пыли и песка заносятся в смазочные, гидравлические и пневматические системы машин, что увеличивает интенсивность гидроабразивного и газоабразивного изнашивания деталей. Следует отметить высокую проникающую способность мелкой пыли, для которой во многих случаях существующие системы уплотнений и фильтров не создают ощутимых преград.

Во время пыльных бурь пыль и песок, попадая между тормозными дисками (барабанами) и фрикционными накладками, увеличивают коэффициент трения и тормозной момент. При неизменной характеристике тормоза и инерционных масс это приводит к уменьшению времени торможения. В тормозных системах машин такое (внезапное) увеличение момента, развиваемого тормозом, может привести к опасному увеличению инерционных нагрузок на элементы механизмов и детали ходовых и несущих систем.

Воздействие инея, гололёда, метелей. *Иней*, оседая на внешних и внутренних поверхностях деталей, не оказывает существенного влияния на структуру их материалов. В то же время, проникая в трещины и поры изоляционных материалов, иней может значительно снизить их удельное электрическое сопротивление. Оседая толстым слоем на неизолированных электрических проводниках, иней уменьшает воздушный диэлектрический промежуток между этими проводниками, что может вызывать замыкание проводников. Оседая на изоляторах и проводах, слой инея создает условия для пробоя на корпус.

Гололед и гололедица вызывают образование слоя льда на поверхности материалов, а у влажных гигроскопических материалов, кроме того, появление льда в порах, что снижает электрическое сопротивление этих материалов. В последнем случае наиболее опасна гололедица, возникающая после оттепели и дождя при резком похо-

лодании. При замерзании влаги, проникшей в материал, происходят микроразрушения этого материала, вызываемые увеличением объёма льда. При переходе льда в жидкую фазу (при оттепели или нагреве материала) увеличенные размеры пор, как правило, сохраняются, что создает рыхлость материала.

При метелях снег заносится в самые труднодоступные, хорошо укрытые места машин, оказывая дополнительное повреждающее воздействие на элементы машин. Воздействие на материалы мокрого снега или снега, тающего на поверхности материала, аналогично воздействию влаги, тумана и росы. Снег, заполнивший воздушный промежуток между неизолированными электрическими проводниками, снижает до нулевого значения сопротивление воздуха как изоляционной среды.

Сухой снег при метелях повышает интенсивность эрозионных повреждений корпусных деталей, в том числе лаковых и гальванических покрытий, стёкол и др.

Комплексное воздействие основных климатических факторов. В реальных условиях на машины, эксплуатируемые на открытом воздухе, воздействует весь комплекс климатических факторов. При этом суммарное повреждающее воздействие формируется каждым из факторов, а также их совместным действием. Во многих случаях на свойства материалов, надёжность машин и системы человек – машина – объект определяющее влияние оказывают не столько отдельные климатические факторы, сколько их неблагоприятные сочетания. Наиболее неблагоприятными являются сочетания таких факторов, как низкие температуры воздуха и ветер, высокие температуры воздуха и низкая влажность и др.

Исследовать совместное влияние нескольких климатических факторов на свойства материалов можно методами активного эксперимента с использованием камер искусственного климата и методами пассивного эксперимента – проведением натурных эксплуатационных испытаний.

Большинство атмосферных явлений и климатических факторов даже при умеренной их интенсивности представляют для машин, сооружений и человека определенное повреждающее воздействие. При интенсивном и весьма интенсивном проявлении эти погодные факторы представляют собой особо опасные явления отдельных классов. Воздействие некоторых из этих особо опасных явлений не

только способно сделать неработоспособными отдельные машины или чрезмерно повысить опасность их эксплуатации.

Техническая жесткость климата и погоды

Характеристики каждого из климатических факторов оказывают различное воздействие на развитие повреждающих процессов. Наиболее неблагоприятное влияние на свойства материалов и показатели надёжности машин оказывают комплексы факторов холодного, жаркого сухого и жаркого влажного климата. Значительно меньшее влияние оказывают комплексы факторов умеренного климата.

Интенсивность воздействия комплекса климатических факторов на свойства материалов и надёжность технических устройств принято обозначать как техническую жёсткость климата и погоды. Впервые понятие жесткости (суровости) холодной погоды применительно к человеку было введено Г. Бодманом. Эта жёсткость определяется в баллах (единицах) по формуле

$$S = (1 - 0{,}04t) \cdot (1 + 0{,}272v), \qquad (4.105)$$

где t – значение отрицательной температуры воздуха, °С; v – максимальная скорость ветра в момент действия температуры t, *м/с*.

Достаточно адекватно отражая жёсткость холодной погоды применительно к человеку, формула Бодмана оказалась малопригодной для оценки показателей жесткости климата и погоды в отношении технических систем, поэтому очевидна необходимость установления обобщенных показателей комплексного воздействия климатических факторов на свойства материалов и надёжность машин, поскольку констатация влияния только отдельных факторов не определяет истинной закономерности явления в целом. Если попытаться оценить влияние климатических факторов на человека, машину и объект воздействия машины, то окажется, что это влияние весьма различно. Целесообразно оценивать это влияние раздельно для технических систем и человека, введя понятия технической и биологической жесткости климата и погоды (табл. 4.23).

В любом случае представляется необходимой разработка математических моделей технической жесткости климата и погоды отдельно для холодного и жаркого климата с учётом различных комплексов и интенсивности воздействия климатических факторов этих видов климата.

Таблица 4.23 – Характеристика интенсивности (жесткости) воздействия климатических факторов на элементы системы человек – машина – объект воздействия машины

Климатические факторы	Интенсивность воздействия на элементы системы		
	Человек	Машина	Объект
Солнечная радиация	Умеренное	Сильное	Весьма слабое
Температуры воздуха:			
низкие	Сильное	Весьма сильное	Сильное и умеренное
высокие	Сильное	Сильное[1]	Умеренное
Суточные и годовые амплитуды температур воздуха	Умеренное	Значительное	Слабое и умеренное
Влажность воздуха:			
высокая, осадки	Значительное[2], слабое	Сильное	Сильное
низкая	Слабое	Значительное	Умеренное
Ветер	Сильное	Умеренное	Сильное[3]

[1] Для деталей из полимерных материалов и РТИ; [2] в сочетании с высокими температурами воздуха; [3] в сочетании с высокими температурами и низкой влажностью.

Для повышения точности моделирующих зависимостей необходимо учитывать в них влияние как можно большего числа факторов. Однако такие формулы были бы весьма громоздки, поэтому необходимо отбирать наиболее значимые факторы, существенно влияющие на прогноз технической жесткости климата и погоды.

В общем виде эти модели могут быть представлены как многофакторные функционалы вида

$$N_K, N_П, S_K, S_П = f\left[Q(\tau), t(\tau), \sigma(\tau), \upsilon(\tau), \varphi(\tau), n_{а.я.}(\tau), \tau_{х.т}\right], \quad (4.106)$$

где $N_K, N_П$ – обобщенные показатели технической жесткости соответственно холодного климата и погоды; S_K, $S_П$ – то же жаркого климата и погоды; Q – суммарная солнечная радиация; t – температура наружного воздуха; σ – средний размах суточных колебаний температуры воздуха; υ – средняя скорость ветра; φ – относительная влажность воздуха; $n_{а.я.}$ – атмосферные явления, влияющие на надёжность машин; $\tau_{х.т}$ – продолжительность действия отрицательных и положительных температур воздуха в течение года.

На рисунке 4.43 в качестве примера проведена средневзвешенная априорная диаграмма рангов при определении технической жесткости климата.

Поскольку воздействия климатических факторов на свойства материалов и показатели надёжности машин имеют случайный, неуправляемый характер, математическим аппаратом их исследования являются методы математической статистики, в частности, методы дисперсионного и рангового многофакторного корреляционного анализа. Каждому фактору эксперт присваивает ранг в соответствии со значимостью фактора в оценке параметра оптимизации. Применительно к влиянию климатических факторов на технические системы оценочным является балл технической жесткости климата (погоды).

Таким образом определяются существенные факторы, отсеиваются несущественные и определяется значимость каждого фактора в многофакторном функционале (4.106), что позволяет создать адекватные математические модели технической жесткости климата и погоды. Оценка степени согласованности экспертных оценок с помощью коэффициентов конкордации W и парной ранговой корреляции R по Спирмену показала хорошую согласованность этих оценок ($W=0{,}735;\ R=\frac{0{,}44}{0{,}88}$). Проверка этих коэффициентов по критерию χ^2 показала их значимость с вероятностью 0,99.

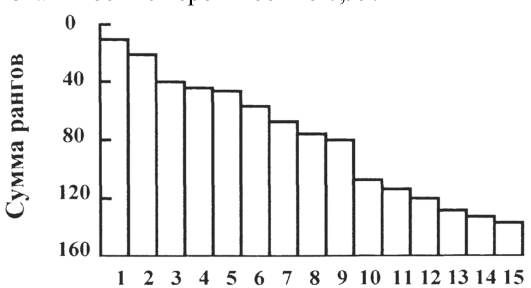


Рис. 4.43 – Априорная диаграмма рангов климатических факторов: *1* – $t_{в\min ср}$; *2* – $t_{в\min абс}$; *3* – относительная влажность воздуха; *4* – прямая солнечная радиация; *5* – амплитуда температуры воздуха; *6* – средняя скорость воздуха; *7* – пыльная буря; *8* – рассеянная радиация; *9* – продолжительность жаркого периода; *10* – туман; *11* – максимальная скорость ветра; *12* – количество осадков; *13* – атмосферное давление; *14* – переход $t_в$ через 0°С; *15* – направление ветра.

Установленные баллы технической жесткости климата России находятся в пределах 4–165, а возможный диапазон баллов 0–170 делится на 5 групп (табл. 4.24). Экстремальными климатическими условиями полагаются холодный и жаркий климат.

Техническая жесткость холодного климата. Из факторов холодного климата только низкие температуры воздуха способствуют увеличению параметра потока отказов деталей машин, изготовленных из металлов и их сплавов. Наиболее характерным является увеличение при низких температурах числа отказов несущих и ходовых систем, рукоятей, стрел и ковшей экскаваторов, деталей бульдозеров, валов, осей и зубчатых колес машин и др.

Таблица 4.24 – Техническая жесткость климата

Климат	Баллы технической жесткости климата	
	холодного	жаркого
Маложесткий	0–30	0–15
Умеренно жесткий	31–60	16–25
Жесткий	61–90	26–35
Очень жесткий	91–120	36–45
Наиболее жесткий	121–170	46–60

Из графика, приведенного на рисунке 4.44, видно, что в зимние месяцы параметры потока отказов балок рукоятей карьерных экскаваторов СЭ-3 и ЭКГ-4 (эксплуатация на Коркинском угольном карьере Челябинской области) многократно превышают параметры потока отказов этих балок в летние месяцы. Корреляционный анализ зависимости параметра потока отказов рукоятей из стали БСт.3 экскаваторов ЭКГ-4 и СЭ-3 при их эксплуатации от минимальных температур воздуха показал достаточно тесную связь этих величин: выборочный коэффициент корреляции r_n = 0,817; доверительная оценка коэффициента корреляции β = 0,99.

Аналогичное влияние низкие температуры воздуха оказывают на параметры потока отказов ковшей экскаваторов (рис. 4.45). Кроме низких температур на параметр потока отказов ковшей оказывают влияние динамические нагрузки: при разработке крепких грунтов (кривая 2) эти нагрузки и параметры потока отказов наибольшие.

Уравнения выборочных линий регрессии имеют вид

$$\omega = 0{,}03(t_{\min} - 28{,}5) + 1{,}525;\ \ t_{\min} = 22(\omega - 1{,}525) + 28{,}5. \qquad (4.107)$$

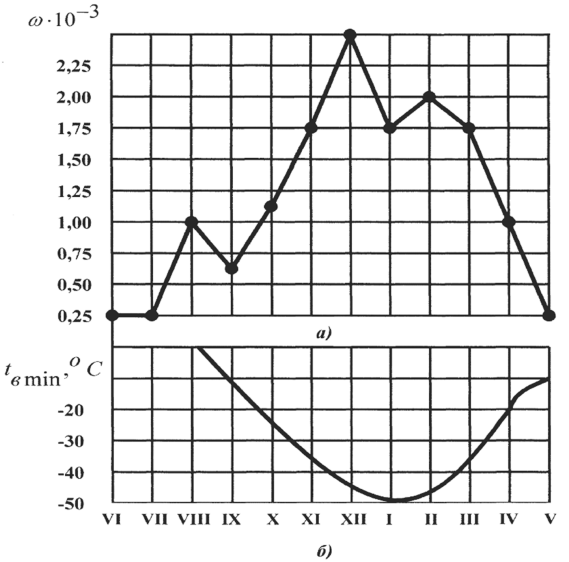


Рис. 4.44 – Изменение по месяцам параметра потока отказов балок рукоятей карьерных экскаваторов (*а*) и минимальной температуры воздуха в районе карьера (*б*)

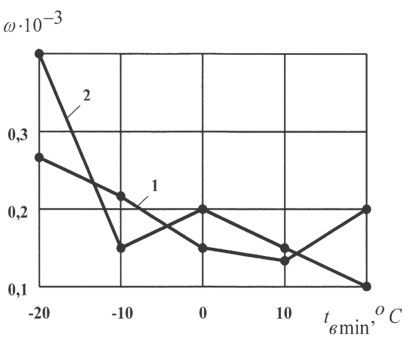


Рис. 4.45 – Зависимость параметра потока отказов ω ковшей драглайна от температуры воздуха $t_в$: *1* – при разработке грунтов I и II категорий; 2 – то же, III–IV категорий.

Во всех рассмотренных случаях необходимо установление зависимостей общего количества отказов деталей и/или увеличения пара-

метров потоков их отказов от низких температур воздуха. Однако иногда причину ухудшения этих показателей видят только в действии низких температур, что не всегда верно. В конструкцию сложных машин входят детали, изготовленные из разнообразных материалов, и параметры потоков отказов зависят не только от влияния низких температур, но и от других климатических факторов, хотя определяющим в большинстве случаев является влияние низких температур.

Применительно к технической жесткости холодного климата функционал (4.106) имеет вид

$$N_K = f\left[t_{\min}, \sigma_x, \upsilon_x, \varphi_x, n_{а.я.}, \tau_x\right], \tag{4.108}$$

где $t_{\min}$ – минимальные температуры воздуха; σ_x, υ_x, φ_x, $n_{а.я.}$, τ_x – параметры, относящиеся к холодному времени года.

В условиях холодного резко континентального климата эффект воздействия основных климатических факторов на свойства материалов и надёжность машин во всех случаях является отрицательным: чем более интенсивно воздействует каждый из факторов, тем больше отрицательный эффект их совместного действия, что должно учитываться в математических моделях технической жесткости климата и погоды.

С использованием результатов рангового анализа и уравнения (4.108) формула для определения технической жесткости холодного климата в баллах примет вид

$$N_к = \left(0,75t_{\min ср} + 0,25t_{\min абс}\right)\left(1+0,015\sigma_x\right)\left(1+0,07\upsilon_x\right)\times \\ \times\left(1+0,26\varphi_x\right)\left(1+0,014n_{т.м}\right)\left(1+0,022\tau_x\right), \tag{4.109}$$

где $t_{\min ср}$ – среднее значение минимальных температур воздуха за три наиболее холодных месяца, °С; $t_{\min абс}$ – среднее значение абсолютного минимума температуры воздуха за три наиболее холодных месяца, °С; σ_x – средний непериодический размах суточных колебаний температуры воздуха за три наиболее холодных месяца, °С; υ_x – средняя скорость ветра за три наиболее холодных месяца, м/с; φ_x – среднее значение относительной влажности воздуха за три наиболее холодных месяца в долях единицы; $n_{а.я.}$ – среднее значение за месяц числа дней с туманом и метелью за три наиболее холодных месяца; τ_x – продолжительность действия в месяцах средней температуры воздуха ниже нуля.

Климатограмма холодного климата показана на рисунке 4.46.

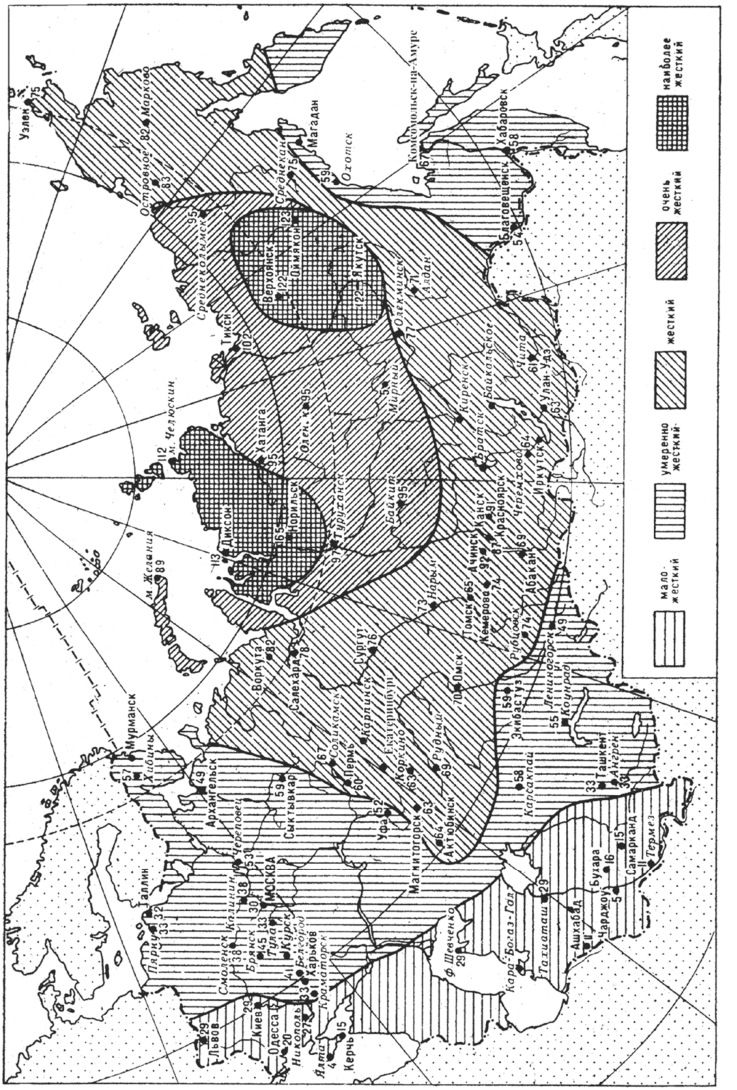


Рис. 4.46 – Распределение на территории СНГ баллов технической жесткости холодного климата

Наибольшие баллы технической жесткости холодного климата имеют районы Норильска (совместное влияние низких температур воздуха и скорости ветра) и Оймякона (влияние низких температур воздуха).

Факторы холодного климата оказывают наиболее глубокое и всестороннее влияние на свойства материалов и на всю систему человек – машина – объект воздействия машины и создают наиболее тяжелые условия для функционирования элементов этой системы. В результате этого производительность машин многих видов в зимнее время года значительно (на 15–25% и более) снижается, соответственно снижая общую эффективность применения машин и производительность горнодобывающих, транспортных и других предприятий.

Затраты на содержание техники, не предназначенной для эксплуатации в условиях Севера, здесь обычно в 2–4 раза и более превышают затраты на её содержание в условиях умеренного климата.

Основными причинами увеличения этих затрат являются увеличение затрат на запасные части и неплановые ремонты машин.

Проблема обеспечения высоких показателей надёжности машин при их эксплуатации в условиях холодного климата является, таким образом, очень важной. Решение проблемы охватывает весьма широкий круг вопросов: от создания материалов (металлов, пластиков, резин, масел, смазок и др.) до создания конструкций машин, в полной мере отвечающих условиям их работы в холодном климате.

Вследствие высокой континентальности климата России факторы холодного климата в зимний период года действуют и в южных районах страны, поэтому баллы технической жесткости холодного климата для южных районов здесь также являются показателями влияния климатических факторов, хотя в этих условиях более точным является термин «техническая жесткость холодной погоды».

Проблема обеспечения надёжности машин при их эксплуатации в условиях холодного климата актуальна не только для России, имеющей большую территорию воздействия такого климата, но и для всех промышленно развитых северных стран (Канады, США (штат Аляска), Норвегии, Швеции, Финляндии и др.).

Техническая жесткость холодной погоды обусловливается воздействием тех же климатических факторов, что и техническая жесткость климата. Изменяется лишь учитываемая продолжительность воздействия этих факторов, при этом значимость отдельных

факторов и их ранжирование остаются неизменными. Всё это позволяет принять за основу математической модели технической жесткости холодной погоды математическую модель технической жесткости холодного климата.

Наиболее удобной является оценка месячных баллов технической жесткости. Тогда формула для определения технической жесткости холодной погоды примет вид

$$N_{n.x} = \left(0,75t_{\min ср} + 0,25t_{\min абс}\right) \times \left(1+0,015\sigma_x\right)\left(1+0,07\upsilon_x\right)\left(1+0,26\varphi_x\right)\left(1+0,014n_{т.м}\right), \quad (4.110)$$

где $t_{\min ср}$, $t_{\min абс}$, σ_x, υ_x, φ_x, $n_{а.я.}$, τ_x – средние за месяц значения климатических факторов и атмосферных явлений.

Техническая жесткость жаркого сухого климата определяется совокупным неблагоприятным воздействием солнечной радиации высокой интенсивности, высоких температур воздуха, низкой влажности воздуха.

Комплекс факторов жаркого сухого климата в целом неблагоприятно влияет на надёжность машин. Это влияние во многом зависит от назначения машины (землеройная, транспортная и др.), её конструкции, вида привода (электрический или гидравлический), видов и свойств материалов её деталей, степени приспособленности машины для эксплуатации в условиях жаркого сухого климата, в том числе в условиях пустынь и полупустынь. Поэтому следует рассматривать это влияние на примере типовых машин, используемых в условиях жаркого сухого климата.

В наибольшей степени на действие факторов жаркого сухого климата реагируют двигатели внутреннего сгорания мобильных машин. Высокие температуры воздуха и солнечная радиация вызывают перегрев двигателей и электрооборудования, нарушают работу систем питания двигателей. Элементы двигателей зачастую нагреваются до температуры свыше 100°С. Температура воздуха в подкапотном пространстве двигателей автомобилей поднимается до 60–75°С при температуре наружного воздуха 40°С. Температура обмоток реле и другого электрооборудования поднимается до 95–135°С.

В условиях пустынь и полупустынь резко снижается эффективность работы систем охлаждения двигателей вследствие повышения температуры охлаждающей жидкости до 105°С, что вызывается загрязнением радиаторов пылью, песком, насекомыми и образованием

накипи внутри деталей системы охлаждения. Последнее объясняется, как правило, высоким (до 20%) содержанием солей в воде районов пустынь.

Перегрев двигателей вызывает быстрое обгорание выпускных клапанов и их седел, образование трещин в головках цилиндров, задиры цилиндров и может приводить к заклиниванию поршней в цилиндрах. При высокой температуре воздуха снижается его плотность и увеличивается объём паров топлива, входящего в состав паровоздушной смеси, поступающей в цилиндры двигателя, в результате чего снижаются коэффициент наполнения цилиндров, крутящий момент и мощность двигателей.

Нормальными полагают условия, когда температура воздуха на входе в систему питания ДВС 20−25°С, температура охлаждающей воды 90°С и температура масла 80°С. В экстремальных условиях жаркого сухого климата температура воздуха на входе в карбюратор достигает 80°С, температура воды 120°С, температура масла 115°С. Это приводит к снижению мощности ДВС на 25–30%.

При высоких температурах воздуха в системах питания ДВС (в топливопроводах и насосах) образуются паровоздушные пробки, что вызывает перебои в работе ДВС. Повышение температуры паровоздушной смеси приводит к тому, что антидетонационные свойства топлив снижаются на 1−2 единицы и увеличивается опасность детонации. Для частичной нейтрализации этих явлений необходимы бензины с более высокими показателями антидетонационных свойств.

Высокие температуры масла в картерных системах двигателей вызывают его повышенный угар и испарение легких фракций. В сочетании с насыщением масел продуктами сгорания топлив и внешними абразивными частицами это приводит к быстрой потере свойств масла.

Такие режимы эксплуатации вызывают быстрое старение полимерных материалов и, прежде всего, изоляции электрического оборудования (пересыхание, образование трещин и др.). На фоне высоких вибраций эти дефекты быстро прогрессируют, в результате чего возможно появление открытых искр между проводниками, что особенно опасно в атмосфере, насыщенной парами бензина.

Особенно неблагоприятно прямая солнечная радиация и высокие температуры воздуха воздействуют на полимерные конструкционные материалы. Под действием высоких температур и солнечной радиации происходит быстрое старение резины автомобильных шин.

В целом в условиях жаркого сухого климата возможное повышение влажности воздуха оказывает благотворное влияние на свойства материалов и показатели надёжности машин, что должно быть учтено в математических моделях технической жесткости сухого жаркого климата и погоды.

Математическую модель технической жесткости жаркого сухого климата можно построить, используя методы построения математической модели технической жесткости холодного климата. Ранжирование степени влияния климатических факторов жаркого сухого климата на показатели надёжности машин показывает, что наиболее существенно на жесткость жаркого сухого климата влияют солнечная радиация, высокие температуры воздуха, большие суточные размахи температуры воздуха, низкая влажность воздуха, песчаные и пыльные бури.

На основании рангового анализа и анализа влияния климатических факторов жаркого климата на свойства материалов и надёжность машин математическая модель для определения технической жесткости жаркого сухого климата в баллах примет следующий вид:

$$S_{к.с} = \left(0,55t_{\max ср} + 0,20t_{\max абс}\right)\left(1+0,01Q_m\right)\left(1+0,0075\sigma_m\right)\times$$
$$\times\left(1-0,03\upsilon_m\right)\left(1+\frac{0,08}{\varphi_m}\right)\left(1+0,009n_{б.т}\right)\left(1+0,012\tau_m\right), \qquad (4.111)$$

где $t_{\max ср}$ – среднее значение минимальных температур воздуха за три наиболее теплых месяца, °С; $t_{\max абс}$ – среднее значение абсолютного минимума температуры воздуха за три наиболее теплых месяца, °С; Q_m – среднее значение месячной суммы суммарной солнечной радиации за три наиболее теплых месяца; σ_m – средний непериодический размах суточных колебаний температуры воздуха за три наиболее теплых месяца, °С; υ_m – средняя скорость ветра за три наиболее теплых месяца, м/с; φ_m – среднее значение относительной влажности воздуха за три наиболее теплых месяца в долях единицы; $n_{б.т.}$ – среднее значение за месяц числа дней с пыльной бурей и туманом за три наиболее теплых месяца; τ_m – продолжительность действия в месяцах средней температуры воздуха выше 0°С.

Установленные значения баллов технической жесткости жаркого сухого климата на территории России находятся в пределах 5–57, возможный диапазон этих значений на территории СНГ в районах Средней Азии составляет 0–60. Указанный диапазон варьирования баллов технической жесткости жаркого сухого климата разбивают на 5 зон, указанных на рисунке 4.47.

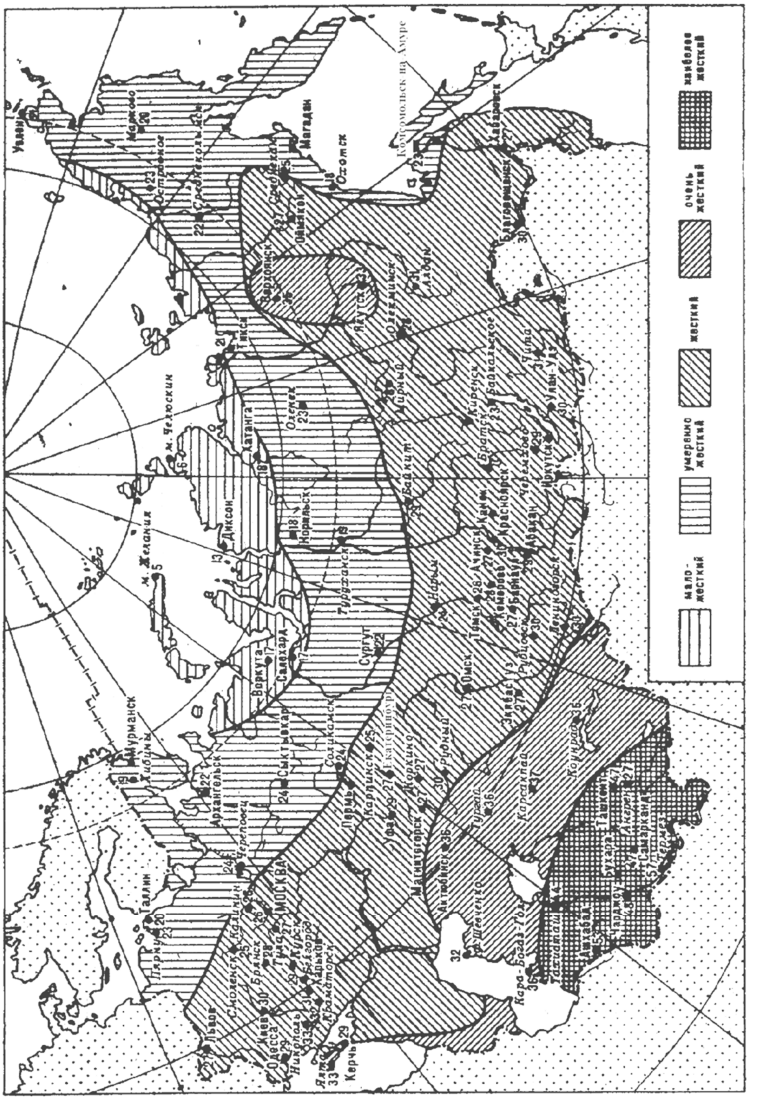


Рис. 4.47 – Распределение на территории СНГ баллов технической жесткости жаркого климата

Техническая жесткость жаркой сухой погоды. За основу математической модели технической жесткости жаркой сухой погоды принимают математическую модель технической жесткости жаркого сухого климата. Фактор длительности воздействия положительных температур воздуха учитывается здесь как постоянная величина. Тогда техническая жесткость жаркой сухой погоды в баллах рассчитывается по формуле

$$S_{п.с} = \left(0{,}55 t_{\max ср.м} + t_{\max абс.м}\right)\left(1+0{,}01 Q_м\right)\left(1+0{,}0075\sigma_м\right)\times$$
$$\times\left(1-0{,}03\upsilon_м\right)\left(1+\frac{0{,}08}{\varphi_м}\right)\left(1+0{,}009 n_{б.т.м}\right), \qquad (4.112)$$

где $t_{\max ср.м}$, $t_{\max абс.м}$, $Q_м$, $\sigma_м$, $\upsilon_м$, $\varphi_м$, $n_{б.т.м}$ – среднемесячные значения климатических факторов и атмосферных явлений.

Баллы технической жесткости жаркого сухого климата для северных районов определяют как показатели влияния факторов жаркого климата и жаркой погоды и характеризуют континентальность климата этих районов. Термин «жаркий климат» применительно к северным районам является условным.

Техническая жесткость жаркого влажного климата. К районам жаркого влажного климата относятся районы тропического и влажного субтропического климата. На территории России к району влажного субтропического климата относят теплую влажную зону Черноморского побережья.

Эксплуатация машин в условиях влажных тропиков и субтропиков связана с воздействием на них климатических факторов жаркого влажного климата. На показатели надёжности машин, эксплуатируемых в условиях жаркого влажного климата, наиболее неблагоприятно влияют высокая интенсивность воздействия солнечной радиации, высокие температуры и влажность воздуха, большое количество осадков, а также сочетания этих факторов.

Воздействие солнечной радиации в условиях жаркого влажного климата менее активно по сравнению с её воздействием в условиях жаркого сухого климата, что объясняется меньшей проницаемостью влажного воздуха для ультрафиолетовых лучей.

Воздействия высоких температур на показатели надёжности различных машин при их эксплуатации в условиях жаркого влажного климата и жаркого сухого климата аналогичны, при этом высокая влажность воздуха придает воздействию высоких температур на изо-

ляцию электрического оборудования и проводников ускоренное разрушающее воздействие. Высокая влажность воздуха ускоряет протекание коррозионных процессов, в том числе микробиологической коррозии. В жарком влажном климате создаются благоприятные условия для электрохимической коррозии металлов вследствие образования между металлическими элементами, имеющими различные электродные потенциалы, тонкой проводящей плёнки.

Комплексное воздействие солнечной радиации, тепла и влаги воздуха ускоряет процессы старения полимерных материалов: резины, изоляционных материалов, пластмасс, лакокрасочных покрытий и др.

Толщина слоя смазки, разъединяющего трущиеся поверхности узлов трения машин, зависит от вязкости масла, скорости относительного перемещения трущихся поверхностей, удельных нагрузок на эти поверхности и других факторов. Так, для жидкостного гидродинамического трения в подшипнике скольжения толщина несущего масляного слоя определяется по формуле Гюмбеля – Фальца

$$h_{\min} = \mu d^2 n / (18{,}36 qsc), \qquad (4.113)$$

где μ – вязкость масла; d – диаметр цапфы вала; n – частота вращения вала; q – удельная нагрузка на цапфу вала; s – начальный зазор между валом и подшипником; c – поправка на конечную длину подшипника.

Под влиянием высоких температур вязкость масла уменьшается на один-два порядка, соответственно уменьшается и толщина масляного слоя, что при наличии микронеровностей трущихся поверхностей вызывает их непосредственный контакт. Такой контакт обуславливает переход к режиму сухого трения, что ведет к повышению интенсивности изнашивания. В условиях высоких контактных давлений в этой зоне может возникнуть молекулярное взаимодействие деталей трущейся пары, приводящее к схватыванию и заеданию поверхностей. Однако широкий ассортимент выпускаемых смазочных материалов с различными значениями вязкости, температуры вспышки и т. д. позволяет выбирать смазочные материалы и технические жидкости, пригодные для машин в тропическом исполнении.

В условиях жаркого влажного климата высокие требования предъявляются к хранению и консервации оборудования. Антикоррозионная защита внутренних и некоторых наружных поверхностей обеспечивается применением антикоррозионных присадок (ингибиторов коррозии) и жидких ингибированных масел. Для предотвраще-

ния коррозии наиболее ответственные узлы машин герметизируют с предварительным размещением в изолированных объёмах поглотителей влаги (силикагеля и др.).

В конструкциях некоторых машин используют древесину (платформы грузовых автомобилей и др.). Она же является основным упаковочным материалом. Во всех случаях принимают меры по предотвращению разрушения древесины грибковой плесенью.

Учитывая, что влияние факторов жаркого сухого климата одинаково для сухого и влажного климата, получим следующую формулу (4.114) для определения технической жесткости жаркого влажного климата (в баллах):

$$S_{к.в} = \left(0,55t_{\max ср} + 0,20t_{\max абс}\right)\left(1+0,01Q_{м}\right)\left(1+0,0075\sigma_{м}\right)\times \\ \times\left(1-0,03\upsilon_{м}\right)\left(1+0,026\varphi_{м}\right)\left(1+0,009n_{д.т.м}\right)\left(1+0,012\tau_{м}\right), \qquad (4.114)$$

где $t_{\max ср}$, $t_{\max абс}$, $Q_{м}$, $\sigma_{м}$, $\upsilon_{м}$, $\varphi_{м}$, $\tau_{м}$ – средние за месяц значения климатических факторов за три наиболее теплых месяца; $n_{д.т.м}$ – среднее число дней с дождями, туманом и грозами за три наиболее теплых месяца.

Техническая жесткость жаркой влажной погоды. Математическая модель технической жесткости жаркой влажной погоды может быть построена на основе формулы (4.115) технической жесткости влажного жаркого климата:

$$S_{п.в} = \left(0,55t_{\max ср.м} + 0,20t_{\max абс.м}\right)\left(1+0,01Q_{м}\right)\left(1+0,0075\sigma_{м}\right)\times \\ \times\left(1-0,03\upsilon_{м}\right)\left(1+0,026\varphi_{м}\right)\left(1+0,009n_{д.т.м}\right), \qquad (4.115)$$

где $t_{\max ср.м}$, $t_{\max абс.м}$, $Q_{м}$, $\sigma_{м}$, $\upsilon_{м}$, $\varphi_{м}$, $n_{д.т.м.}$ – средние за месяц значения климатических факторов и атмосферных явлений.

Техническая жесткость климата и погоды в высокогорных местностях. С увеличением высоты местности над уровнем моря существенным образом изменяются значения большинства климатических факторов: солнечной радиации, температуры воздуха, его влажности, атмосферного давления и др.

При определении технической жесткости климата и погоды (в баллах) по формулам (4.109)–(4.112), (4.114), (4.115) используют данные о средних значениях t, Q, σ, υ, φ и n в пункте эксплуатации, полученные в результате многолетних наблюдений и, таким образом,

учитывают влияние высоты этого пункта над уровнем моря. Но эти формулы не учитывают непосредственного влияния на надёжность технических изделий атмосферного давления.

Атмосферное давление незначительно изменяется в течение времени года и весьма значительно – по мере увеличения высоты над уровнем моря. Известно, что если принять давление воздуха на уровне моря за единицу, то на высоте 1000 м оно будет равно 0,88, на высоте 2000 м – 0,78 и на высоте 3000 м – 0,69.

Нормативной документацией предписано, что показатели надёжности, указываемые в технической документации на систему промышленных приборов и средств автоматизации, должны определяться при барометрическом давлении 1011±33 ГПа (760±25 мм рт. ст.), т. е. ±3,3% от стандартного значения. Для машин это изменение атмосферного давления может быть допущено в пределах ±5% нормального атмосферного давления. Таким образом, если снижение давления воздуха для машин стандартного исполнения не превышает 10 % нормального атмосферного давления, то показатели надёжности этих машин должны обеспечиваться в заданных пределах при работе в местностях с высотой над уровнем моря не более 1000 м. Для более высокогорных местностей необходимо специальное исполнение соответствующих агрегатов и устройств машин.

Годовые изменения атмосферного давления в данной местности в большинстве случаев находятся в пределах ±5% среднего значения.

Таким образом, формулы (4.109)–(4.112), (4.114), (4.115) действительны для определения баллов технической жесткости климата и погоды в местностях, расположенных на высоте над уровнем моря не более 1000 м. Влияние атмосферного давления на техническую жесткость климата и погоды может быть учтено путём введения в эти формулы коэффициента $k_{а.д.}$ В качестве первого приближения для машин общего значения могут быть приняты следующие значения этого коэффициента, указанные в таблице 4.25.

Таблица 4.25 – Значения коэффициента $k_{а.д.}$

Высота над уровнем моря, м	0–1000	1000–2000	2000–3000
$k_{а.д.}$	1	1,08	1,22

Для местностей, расположенных ниже уровня моря, $k_{а.д.} = 1$.

Воздействие ветра. Из климатических факторов силовое динамическое воздействие на элементы машин может оказывать только ветер. Статические нагрузки на металлические конструкции машин оказывают также снег, лед и иней.

По соображениям безопасности ветровые нагрузки на машины принято разделять на нагрузки рабочего состояния, когда машина может работать, преодолевая эти нагрузки, и на нагрузки нерабочего состояния, когда машина должна быть остановлена.

Допустимые ветровые нагрузки рабочего состояния зависят от конструкций машин. Для подъёмных кранов, например, они должны быть не более 250 Па, что отвечает скорости ветра v = 20 м/с. В условиях особо низких температур работа стреловых кранов прекращается при ветре более 12 м/с. Простои подъёмных кранов из-за ветра в зимнее время в Норильске составляют до 35 сут. Работа экскаваторов допускается при скоростях ветра, не превышающих 20–25 м/с.

Ветровые нагрузки на элементы машин могут достигать значительной величины. Так, при скорости ветра v = 40 м/с динамическое давление равно 1000 Па. С увеличением высоты над уровнем земли скорость ветра и соответствующие силовые воздействия повышаются, и на высоте 60 м они могут достигать 2000 Па.

Распределенная ветровая нагрузка p на 1 м^2 наветренной поверхности машины определяется зависимостью

$$p = q_0 \cdot n_h \cdot c \cdot \beta, \qquad (4.116)$$

где q_0 – динамическое давление ветра на высоте до 10 м над поверхностью земли, Па; n_h – поправочный коэффициент на увеличение динамического давления в зависимости от высоты над поверхностью земли; c – аэродинамический коэффициент, зависящий от форм элементов машин; β – коэффициент, учитывающий переменный характер воздействий, вызываемых пульсацией ветрового давления.

Динамические нагрузки в элементах машин вызывают наибольшие напряжения (вплоть до критических) в тех случаях, когда частота пульсации ветра совпадает с частотой собственных колебаний этих элементов.

Скорость ветра во времени изменяется непрерывно и в широком диапазоне значений. Соответственно этому изменяется и динамическое давление ветра. Динамическое давление и ветровую нагрузку

следует рассматривать как случайное поле давлений, неоднородное по высоте.

Виды и характеристики отказов машин, определяемых воздействием климатических факторов

Климатические факторы оказывают неблагоприятное воздействие на машину не только в период её пуска и работы, но и в периоды хранения. При хранении машина находится в нерабочем состоянии, и в это время отказы, как правило, не возникают. Однако под действием климатических факторов развиваются деградационные процессы, которые в процессе использования машины по назначению ускоряют возникновение её отказов. Отказы подразделяют на пусковые, нагрузочные и рабочие. (рис. 4.48). Названные виды отказов в большинстве эксплуатационных ситуаций взаимосвязаны.

Пусковыми отказами называют такие, вследствие которых детали, агрегаты или системы машин при их исправном состоянии не могут быть пущены в работу (отказы двигателей, гидравлического и пневматического оборудования и др.). Пусковые отказы занимают значительное место среди отказов машин, эксплуатируемых в условиях низких температур. Достаточно сказать, что при пониженных температурах стартерный пуск двигателей внутреннего сгорания занимает 8–20% сменного времени. Чтобы не допускать таких потерь и избежать пусковых отказов в условиях холодного климата, двигатели при низких температурах во многих случаях не останавливают в течение многих суток, независимо от того, работает или не работает машина, на которой установлен этот двигатель.

Нагрузочные отказы машин – это отказы, при возникновении которых машина не может выполнять расчётные нагрузки, т. е. не может в полной мере выполнять свои эксплуатационные функции. Нагрузочные отказы являются следствием нарушения функциональных связей между элементами машины или между машиной и эксплуатационной средой, например дорогой, под действием климатических факторов – низких температур, влаги, тумана, инея, гололеда и др.

К типичным нагрузочным отказам относятся буксование пневмоколесных машин, снижение моментов, передаваемых фрикционными муфтами, снижение эффективности тормозов и др.

Нагрузочные отказы возникают, главным образом, непосредственно после пуска машины, однако возможно их появление и во время рабочего цикла, например при проникновении в узлы влаги, пыли и др.

Рабочие отказы возникают в процессе работы машины. По природе своего возникновения они могут быть внезапными, износными и климатическими.

Внезапные отказы возникают вследствие воздействия случайных факторов и концентрации напряжений в элементах машин, возникающей в результате протекания рабочих процессов.

Износные отказы характеризуются не только достижением предельных износов в деталях трущихся пар машин. Такие отказы – следствие достижения предельного состояния в результате протекания и других повреждающих процессов: коррозии, усталости, эрозии и старения.

Климатическими отказами называют такие, причинами возникновения которых является воздействие климатических факторов на свойства материалов деталей машин, топливо и эксплуатационные материалы и на машину в целом (обледенение, попадание в механизмы влаги, пыли и др.). По характеру проявления большинство климатических отказов относится к внезапным.

В соответствии с характером факторов, обуславливающих возникновение отказов, необходимо различать ***структурную и климатическую надёжность*** машин.

Под *структурной надёжностью* понимают показатели надёжности машин, реализуемые при их эксплуатации в условиях, когда баллы технической жесткости холодной и жаркой погоды равны нулю или малы по своим значениям (ординаты на рис. 4.44). Структурная надёжность определяется потоком внезапных и износных отказов и характеризует совершенство структурной схемы машины и расчётов элементов машин, применение систем резервирования и других конструктивных мероприятий, обеспечивающих оптимальные показатели избыточности.

Под *климатической надёжностью* понимают степень приспособленности машин к обеспечению показателей надёжности – безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости – в условиях активного воздействия климатических факторов. Климатическая надёжность машин характеризуется потоком отказов, возникающих в результате действия климатических факторов.

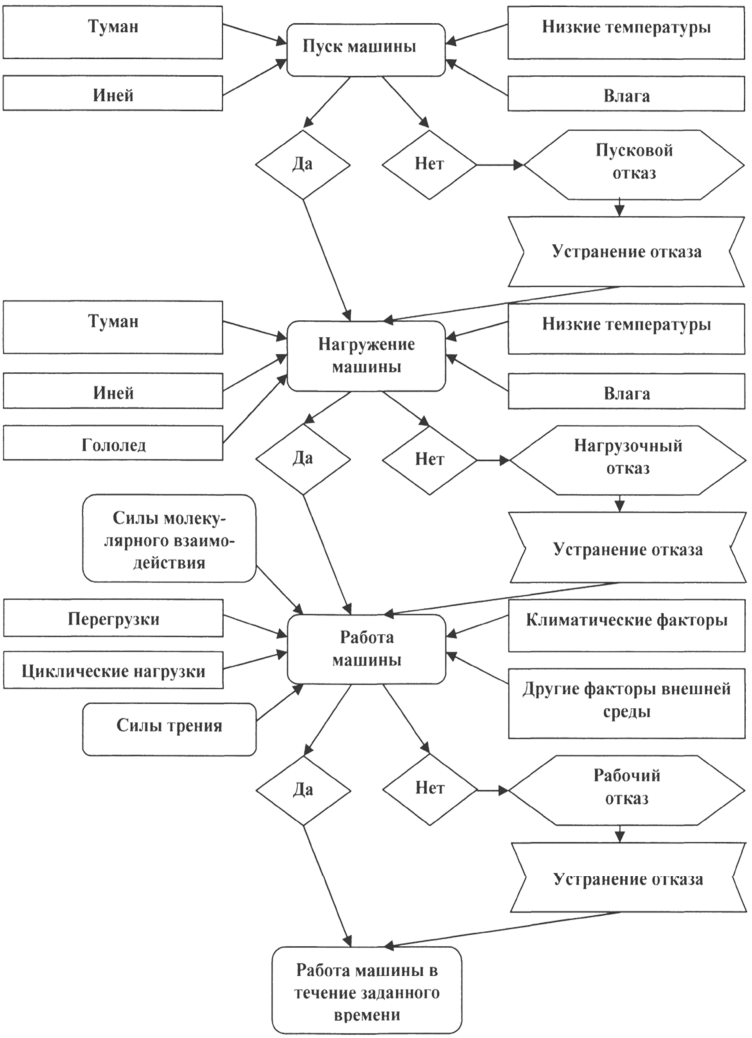


Рис. 4.48 – Схема влияния климатических факторов и внешних нагрузок на пусковые, нагрузочные и рабочие отказы машин, эксплуатируемых на открытом воздухе

Рассмотренные ранее зависимости параметра потока отказов подсистем экскаваторов (и, следовательно, самих экскаваторов) от баллов технической жесткости климата и погоды различны и определяются степенью приспособленности конструкции экскаваторов к эксплуатации в данных климатических условиях, т. е. зависят от климатической надёжности подсистем.

На рисунке 4.49 приведены графики типичных функций регрессии $\omega = f(N_П)$ и $\omega = f(S_П)$, охватывающие основной диапазон характеристик надёжности машин по показателям параметров потока отказов.

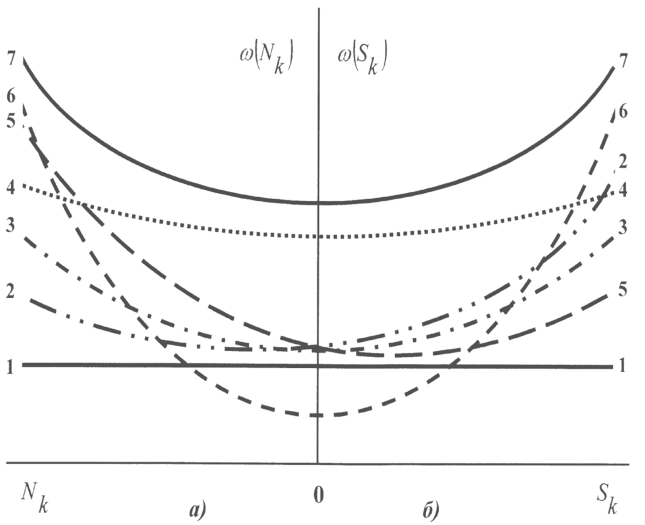


Рис. 4.49 – Типичные графики зависимости параметров потока отказов машин от структурной надёжности и технической жёсткости климата

Надёжность машин определяется сочетанием характеристик их структурной надёжности *С*, климатической надёжности в условиях холодной погоды *Х* и климатической надёжности в условиях жаркой погоды *Ж*. Тогда общая структурная формула характеристик надёжности машин примет вид

$$H = C \cdot X \cdot Ж, \qquad (4.117)$$

где *Н* – общий условный уровень надёжности.

Структурная и климатическая надёжность могут иметь следующие характеристики и уровни: высокие (в), оптимальные (о) и низкие (н).

В тех случаях, когда параметры потока отказов машин и их подсистем не изменяются под действием климатических факторов, они имеют абсолютную характеристику климатической надёжности (а).

Рассмотренная система индексации надёжности машин позволяет характеризовать надёжность каждого типа машин соответствующими структурными формулами вида

$$H = C_y \cdot X_z \cdot Ж_u . \qquad (4.118)$$

Из формулы (4.118) и рисунка 4.44 видно, что можно получить большое число сочетаний структурной и климатической надёжности. Рассмотреть машины всех типов по этим сочетаниям надёжности здесь не представляется возможным, поэтому рассмотрим только наиболее характерные.

Тип I – $H_I = C_o\text{-}X_a\text{-}Ж_a$ (прямая 1–1) – машины структурной оптимальной и абсолютной климатической надёжности, так как параметры потока отказов остаются постоянными в диапазоне всех значений N_n и S_n. Создание сложных машин абсолютной климатической надёжности весьма затруднительно. Поэтому машины первого типа являются только теоретически возможными или идеальными для машин, эксплуатируемых на открытом воздухе.

Тип II – $H_{II} = C_o\text{-}X_o\text{-}Ж_o$ (кривая 2–5) – машины структурной оптимальной и климатической надёжности.

Тип III – $H_{III} = C_o\text{-}X_н\text{-}Ж_o$ (кривая 5–5) – машины структурной оптимальной надёжности, низкой климатической надёжности в условиях холодного климата и оптимальной – в условиях жаркого климата (погоды).

Ниже без расшифровки приводятся структурные формулы остальных типов машин.

Тип IV – $H_{IV} = C_o\text{-}X_o\text{-}Ж_н$ (кривая 2–2).

Тип V – $H_V = C_в\text{-}X_н\text{-}Ж_н$ (кривая 6–6).

Тип VI – $H_{VI} = C_o\text{-}X_в\text{-}Ж_н$ (кривая 2–3).

Тип VII – $H_{VII} = C_o\text{-}X_н\text{-}Ж_o$ (кривая 3–5).

Тип VIII – $H_{VIII} = C_o\text{-}X_н\text{-}Ж_н$ (кривая 5–5).

Тип IX – $H_{IX} = C_н\text{-}X_в\text{-}Ж_в$ (кривая 4–4).

Тип X – $H_X = C_н\text{-}X_н\text{-}Ж_н$ (кривая 7–7).

Из условий оптимизации затрат на создание надёжных машин и эксплуатационных затрат очевидно, что создавать машины типов III, IV, V, VIII, IX и X не имеет смысла.

Наиболее приемлемыми являются машины типа II с оптимальными уровнями структурной и климатической надёжности. При этом под оптимальным понимается уровень надёжности, отвечающий минимуму суммарных затрат на производство машин заданного уровня надёжности и на покрытие расходов, вызванных неполной реализацией показателей надёжности машин (расходы на неплановые ремонты, ущерб от простоев машин и т. п.).

Мероприятия обеспечения надёжности машин при эксплуатации в экстремальных климатических условиях

К общим мероприятиям обеспечения надёжности машин относятся применение в конструкциях машин: хладостойких сталей, низкотемпературных и всесезонных смазочных материалов, обогрева элементов и устройств машин; термической обработки сталей, в результате которой значительно повышается их хладостойкость (нормализация или закалка с отпуском) и хладостойких конструктивных материалов (пластмасс, резин и др.), а также изделий (деталей ременных передач, стальных канатов, подшипников качения и др.); конструктивных мероприятий (снижение концентрации напряжений, снижение динамических нагрузок и др.). Номенклатура эксплуатационных материалов должна назначаться в строгом соответствии с требованиями по применению для имеющихся погодно-климатических условий.

Главными конструктивными мероприятиями по обеспечению надёжности при эксплуатации в условиях жаркого сухого климата являются применение эффективных систем охлаждения, вентиляции и кондиционирования, применение высоконадёжных фильтров для всех рабочих систем машин.

К пассивным методам относят профилактическую остановку машин при возникновении погодно-климатических условий, на которые машины и их конструктивные элементы не рассчитаны; снижение нагрузок на машины путём уменьшения грузоподъемности, производительности, скорости; безостановочную работу двигателей внутреннего сгорания в рабочих и холостых режимах для предупре-

ждения пусковых отказов; исключения длительных включений некоторых механизмов, например ручного тормоза.

Вследствие недостаточного уровня показателей надёжности некоторых моделей машин при действии особо низких температур их эксплуатацию приостанавливают. Например, работу некоторых моделей экскаваторов останавливают при температуре воздуха ниже −40°С.

Критические погодно-климатические условия возникают весьма редко, поэтому общие профилактические простои машин по климатическим условиям на Севере обычно не превышают 3–5% календарного времени.

В зарубежной практике довольно широко применяют снижение нагрузок на машины при действии особенно низких температур путём уменьшения объёма ковшей экскаваторов, неполной загрузки автомобилей-самосвалов и др.

Экстремальные климатические факторы непосредственно воздействуют на человека при управлении машиной, а также при выполнении ремонтных работ и операций по техническому обслуживанию машины.

Наиболее неблагоприятно влияет на организм человека сочетание низких температур воздуха и ветра. Действие ветра существенно усугубляет негативные воздействия низких температур на организм человека.

В нормативной практике США охлаждающее действие ветра оценивают по «эквивалентной температуре», под которой понимают эквивалентную низкую температуру при отсутствии ветра, действующую на организм человека так же, как и более высокая температура при ветре.

Охлаждающее действие на человека ветра при низких температурах определяют по формуле

$$K_o = \sqrt{(100\upsilon - 10{,}45 - \upsilon^2)(33 - T_a)}, \qquad (4.119)$$

где K_o – охлаждающее действие воздуха при ветре, Вт/м^2; υ – скорость ветра, м/с; T_a – температура воздуха, °С.

Весьма суровое воздействие экстремальных климатических факторов на организм человека исключает, как правило, вариант управления машиной с открытого пульта. Необходима кабина, которая не только укрывала бы человека от снега и холода, но в которой создавались бы комфортные климатические условия.

Комфортные климатические условия рабочего места создаются, прежде всего, определенными параметрами воздуха: его температурой, влажностью, минимальными показателями запылённости и загазованности и скоростью движения. При этом температура $t_в$ и влажность воздуха φ должны находиться в определенном соотношении (табл. 4.26).

Таблица 4.26 – Предельно допустимые пары значений температура – влажность воздуха

$t_в$, °С	20	25	30	35
φ, %	85	60	44	33

Климатический комфорт в кабине управления создается её утеплением, установкой эффективных систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Системы обогрева кабин зависят от конструкций машин: у машин с электрическим приводом в кабине устанавливают наиболее удобные электрические обогреватели; у машин с приводом от внутреннего сгорания применяют обогрев от охлаждающей жидкости, отходящих газов или от специальных горелок.

Как показали исследования, при температуре наружного воздуха −38°С необходима подача в кабину управления, например, строительно-дорожной машины 6300−7120 кДж/ч тепла. При электрическом обогреве рационально устанавливать регулируемые по теплотворной способности обогреватели. Из зарубежной практики известно применение обогрева кабин водителей машин многопламенными обогревателями производительностью до 63 МДж/ч. В современных мобильных машинах значения температуры, влажности воздуха, запылённости и интенсивности воздухообмена регулируются автоматически с помощью систем климат-контроля.

5. Испытания на надёжность и диагностирование повреждений

Создание сложных объектов, обладающих заданными высокими значениями показателей технического уровня и надёжности, возможно лишь при условии решения проблемы получения достоверных данных о характеристиках работоспособности деталей, узлов, агрегатов, систем и полнокомплектных изделий. В настоящее время основным средством количественной оценки надёжности объектов являются результаты эксплуатации и специальным образом организованных испытаний. При этом, прежде всего, возникает вопрос организации испытаний, т. е. определения условий испытаний на надёжность, адекватно моделирующих условия реальной эксплуатации объекта. В первую очередь необходимо обоснованное назначение граничных условий, в том числе: количество воздействующих факторов; возможные сочетания факторов; диапазон изменения факторов; порядок изменения уровней варьирования каждого фактора; продолжительность испытаний на каждом уровне фактора и типичных сочетаний факторов; интервал регистрации результатов измерений; объём выборки объектов испытаний. Уже этот неполный перечень условий показывает, что интуитивный выбор плана испытаний может привести к результатам, не соответствующим объективным данным реальной эксплуатации.

Планом испытаний называют заранее намеченный порядок, последовательность и условия осуществления испытаний. Для решения таких важных вопросов, как нормирование показателей надёжности, проверка адекватности методов расчёта надёжности, определение оптимальной периодичности и объёма планово-предупредительных и других профилактических мероприятий, расчёт количества запасных частей и других, необходимо знать реальные значения показателей надёжности машины и её элементов. Испытания на надёжность мобильных машин относятся к числу важнейших и, в зависимости от контролируемых свойств, могут состоять из испытаний на безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость, а также их сочетаний.

Следует отметить, что темпы совершенствования конструкций машин в ряде случаев опережают развитие методов испытаний. При современном состоянии методической и материальной базы испытаний на надёжность нередко возникают ситуации, при которых весьма

затруднительно получить в короткие сроки необходимые сведения о показателях надёжности исследуемых объектов. Применяемый для обработки результатов испытаний на надёжность математический аппарат зачастую не в полной мере соответствует применяемым методикам испытаний. Современные планы испытаний на надёжность недостаточно эффективны вследствие большой продолжительности эксперимента и большого количества необходимых объектов. Планы проведения многофакторных испытаний на надёжность реализуются в недостаточной мере. В связи с бурным развитием средств вычислительной техники ускоренными темпами развиваются математический аппарат и методики выполнения компьютерных экспериментов на математических моделях объектов. Однако компьютерные эксперименты в большинстве случаев выполняют вспомогательную функцию для уточнения граничных условий проведения натурных испытаний или экспериментов на физических, геометрических, локальных и других моделях.

5.1. Виды испытаний

Существующие методы испытаний на надёжность можно классифицировать по следующим основным признакам, поименованным в таблице 5.1.

Определительные испытания на надёжность. В результате этих испытаний определяются количественные значения показателей надёжности исследуемых объектов в статистическом представлении с определением доверительных интервалов – диапазонов возможных значений исследуемых показателей надёжности, соответствующих заданной доверительной вероятности.

В процессе проектирования, производства и эксплуатации машин проводится большое число различных определительных испытаний.

Задачами испытаний на стадии проектирования являются:

– выбор конструкционного материала;

– определение допускаемых напряжений, деформаций и других расчётных характеристик;

– отработка конструкции типовых деталей и их соединений;

– выбор режимов технологических процессов и операций, оценка их эффективности;

– проверка расчётных методик; оценка оптимальности конструктивно-технологических решений типовых и нестандартных узлов, определяющих характеристики машин.

Таблица 5.1 – Классификация видов испытаний на надёжность

№ п/п	Кластерный признак	Классификационный признак
1	Цель испытаний	Определительные испытания
		Контрольные испытания
2	Режим испытаний	В нормальных условиях
		В форсированных (жёстких) режимах
3	Длительность испытаний	Неускоренные (обычные)
		Ускоренные
4	Стадия жизненного цикла объекта	На этапе НИОКР
		На этапе серийного производства
		На этапе эксплуатации
5	Условия проведения испытаний	Лабораторные
		Эксплуатационные
6	Аппарат исследования	Натурный эксперимент
		Моделирование
7	Объект испытания	Материал
		Деталь, модель детали
		Узел, модель узла
		Агрегат, система
		Полнокомплектное изделие или его модель

При этом предполагается, что справочные характеристики типовых материалов, деталей и узлов известны и статистически стабильны. Эти характеристики используются для предварительного выбора материалов и стандартных конструктивных элементов. Окончательный выбор производится после дополнительных испытаний, более полно отражающих условия эксплуатации машин.

В процессе проектирования приходится проводить и специальные испытания материалов и конструктивных элементов, поскольку зачастую справочных данных недостаточно для расчётов показателей

безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости проектируемых объектов при воздействии повреждающих процессов – изнашивания, коррозии, усталости, старения и эрозии, а также их комбинаций. Такие испытания, как правило, выполняют на образцах выбранных полуфабрикатов материалов (листы, штамповка и т. п.), масштабных и локальных моделях. Во многих случаях целесообразно более полное воспроизведение не только натурной конструкции, но и технологии серийного производства. Наиболее сложные образцы – натурные узлы машин – используются для испытаний по специальным программам, отражающим условия реальной эксплуатации машины. Как правило, чем сложнее образцы, тем более правомерным является использование результатов испытаний.

На стадии производства выполняют:

– проверочные испытания образцов материалов, деталей и узлов с целью совершенствования технологии или адаптации конструкции к требованиям технологии;

– контрольные натурные испытания серийных машин или их узлов по программам, максимально воспроизводящим эксплуатационные условия.

На стадии эксплуатации выполняют:

– испытания, связанные с изменением условий эксплуатации (по отношению к заданным при проектировании);

– испытания с целью отработки методов устранения и предупреждения дефектов, выявленных в эксплуатации;

– испытания машин, прошедших длительную эксплуатацию, с целью оценки возможности продления их ресурса;

– испытания с целью проверки допустимости планируемых модификаций машин.

Среди всех видов испытаний машин особое место занимают прочностные испытания. Это объясняется тем, что отказы, вызванные потерей прочности, в основном являются функциональными и тяжёлыми, т. е. вызывающими появление вторичных отказов и потерю работоспособности машины. Испытания машин, их узлов и деталей, конструкционных материалов на прочность настолько разнообразны, что единая классификация, учитывающая все основные признаки, по которым они проводятся, весьма сложна. Прочностные испытания целесообразно классифицировать по признакам, определяемым назначением испытаний, объектом испытаний и условиями его работы в эксплуатации (табл. 5.2).

Таблица 5.2 – Классификация видов испытаний на прочность

№ п/п	Кластерный признак	Классификационный признак
1	По виду образцов	Испытания материалов
		Испытания деталей и простых соединений
		Испытания узлов, агрегатов и систем
		Испытания полнокомплектной машины
2	По условиям проведения испытаний	Лабораторные испытания в обычных условиях
		Лабораторные испытания в экстремальных условиях
		Эксплуатационные испытания в рядовых условиях
		Эксплуатационные испытания на специальных полигонах
3	По характеру и времени действия нагрузочных факторов	Статические на кратковременную прочность
		Длительные статические испытания на замедленное разрушение, на коррозию под напряжением и др.
		На ползучесть и длительную прочность
		Динамические, в том числе ударные
		При периодическом нагружении (многоцикловая усталость), в том числе при комбинированном воздействии повреждающих процессов При периодическом упругопластическом деформировании (малоцикловая усталость)
4	По характеру внешней среды	В обычной («комнатной») среде
		В специальных газовых и жидких средах
		В условиях нормальных погодно-климатических воздействий (температура, влажность, запылённость и т. п.)
		Испытания при низких температурах
		Испытания при повышенных и высоких температурах
		Испытания при циклическом изменении температуры
		Испытания в условиях комбинации экстремальных погодно-климатических факторов
5	По видам нагружения	На растяжение, сжатие, в том числе внецентренное сжатие
		На изгиб
		На кручение
		На сдвиг
		На комбинированное нагружение

Продолжение табл. 5.2

№ п/п	Кластерный признак	Классификационный признак
6	По режимам нагружения	При стационарном режиме воздействий – испытание с постоянной скоростью нагружения или деформирования, с постоянной частотой нагружения
		При нестационарном режиме воздействий
		При программном циклическом нагружении
		При случайных воздействиях
		При комбинации программных и случайных воздействий
		При воспроизведении эксплуатационных воздействий
7	Выявление отдельных показателей процессов	Показатели напряжённо-деформированного состояния
		Характеристики процесса накопления повреждений и разрушения
		Определение предельных состояний объектов

Испытания образцов конструкционных материалов, деталей и узлов машин проводятся на различных испытательных машинах и стендах, собираемых из унифицированных агрегатов и устройств.

Важнейшей задачей конструкторов и испытателей является оценка надёжности изделий в минимальные сроки, поэтому в настоящее время преобладают ускоренные ресурсные испытания. Сокращение продолжительности испытаний машин длительного пользования осуществляется путём применения методов и режимов «комплексных ускоренных испытаний». Комплексными называют такие испытания машин в целом, при которых может быть определен ресурс всех или большей части их элементов.

В процессе комплексных испытаний оценивают: долговечность машины (по совокупности данных о ресурсах её элементов с учётом объёма выполненных ремонтов и номенклатуры заменяемых деталей); безотказность машины по её наработке на отказ данной группы сложности; ремонтопригодность машины (по затратам труда при техническом обслуживании и устранении отказа).

Для обеспечения сопоставимости результатов испытаний, произведенных в разное время или различными организациями, целесообразно проводить комплексные испытания на стендах или полигонах, позволяющих поддерживать стабильность режимов воздействия

на машины. С этой целью, а также с целью полного использования календарного времени при минимальной потребности в персонале процесс испытаний должен быть автоматизирован.

В классической схеме организации испытаний машин стенд – полигон – опытная эксплуатация – эксплуатация у потребителей – ускоренные комплексные испытания занимают ведущее место наряду с полигонными испытаниями.

Для характеристики относительной продолжительности ресурсных испытаний используется показатель – *коэффициент ускорения испытаний*, который показывают, насколько быстрее можно оценить долговечность изделия при испытаниях, чем в эксплуатации.

Коэффициент ускорения по наработке Ку.н – отношение наработки изделий в эксплуатации (в часах) к наработке таких же изделий при испытаниях (в часах) до появления одинаковых повреждений.

Коэффициент ускорения по времени Ку.в – отношение календарного времени работы изделий в эксплуатации к календарной продолжительности испытаний таких же изделий до появления одинаковых повреждений.

Коэффициент перехода Кп равен числу циклов нагружения при испытаниях, эквивалентному по разрушающему воздействию на изделие единице наработки в эксплуатации; по физическому смыслу *Кп* представляет собой величину, обратную *Ку.н*, который характеризует число часов эксплуатации, эквивалентное 1 ч испытаний.

Необходимость в использовании коэффициентов ускорения возникает при прогнозе эксплуатационной долговечности безотказности изделия по результатам ускоренных испытаний, их организации и планировании, сравнении эффективности различных видов или режимов испытаний, выборе метода и режима комплексных испытаний неравнопрочных изделий, элементы которых отказывают в различные моменты времени. В зависимости от особенностей каждой конкретной задачи может использоваться один или два из указанных коэффициентов, иногда даже все три. При этом коэффициент ускорения может быть отнесен к определенному показателю надёжности, оцениваемому при испытаниях, например к гамма-процентному или среднему ресурсу, к средней наработке на отказ или наработке до первого отказа и т. п. При этом необходимо иметь в виду следующее:

а) коэффициент ускорения – величина статистическая, зависящая от рассеивания показателей долговечности испытываемого изделия; точность определения коэффициентов ускорения, как и точность

прогнозов эксплуатационной долговечности по результатам испытаний, зависит от объёма имеющейся информации о надёжности изделий в эксплуатации и при испытаниях;

б) при выборе метода и режима испытаний коэффициент ускорения следует предварительно определить расчётным путём на основе анализа нагруженности изделия при испытаниях и в эксплуатации. В дальнейшем коэффициент ускорения должен быть уточнён экспериментально;

в) детали испытываемой многокомпонентной конструкции, как правило, имеют индивидуальные конструктивные особенности, различную несущую способность, они в различной степени количественно и качественно нагружены, в связи с чем к ним следует применять неодинаковые коэффициенты ускорения;

г) величина $Ку.н$ зависит от различий между эксплуатационным режимом работы и режимом его испытаний; при совпадении этих режимов $Ку.н = 1$, тогда ускорение испытаний достигается только более полным использованием календарного времени испытаний по сравнению с использованием времени в эксплуатации. Если процессы разрушения изделия при испытаниях интенсифицируются, коэффициент $Ку.н$ возрастает; в таких случаях ускорение испытаний может быть достигнуто как путём лучшего использования календарного времени, так и путём ускорения процессов накопления повреждений;

д) величина $Ку.в$ зависит от ряда факторов, главным из которых является среднегодовая наработка изделия в эксплуатации, общая продолжительность его использования и календарная продолжительность испытаний изделий. Если, например, машина работает 120 ч в год на протяжении 8 лет, то, обеспечив испытания в течение 960 ч за 3 календарных месяца, получаем $Ку.в = 8 \cdot 12/3 = 32$; при этом $Ку.н$ может быть равным единице. Таким образом, на величину $Ку.в$ существенно влияет организация испытаний.

Статистическая природа величин коэффициентов ускорения обуславливает возможность однозначного прогноза эксплуатационной надёжности по результатам испытаний: любой прогноз будет иметь вероятностный характер, и следует ожидать, что он подтвердится с определенной вероятностью в пределах известных границ. Это обстоятельство следует помнить и в тех многочисленных случаях, когда исследователи оперируют однозначными величинами коэффициентов ускорения, полагая при этом, что на практике варьирование этих коэффициентов в некоторых пределах – является само собой

разумеющимся. Следовательно, если, например, известно, что *Ку.н* при ресурсных испытаниях агрегатов данной модели в среднем равен 3, то при испытаниях конкретного агрегата этой модели *Ку.н* может оказаться равным, скажем, 2,5 или 3,4.

Можно констатировать значительный диапазон значений коэффициентов: от 1 до 400 по наработке, от 2 до 800 по календарному времени. Коэффициенты ускорения колеблются даже для однотипных изделий (например, агрегатов трансмиссий, подшипников), что объясняется как особенностями конструкции и эксплуатации однотипных изделий, так и вынужденной унификацией методов и режимов испытания, различными подходами испытателей к целесообразности ограничения нагрузок, поиском оптимальных методов испытаний и трактования их результатов.

Очевидны явные преимущества стендовых и полигонных испытаний, позволяющих многократно ускорить оценку показателей надёжности изделий в сравнении с эксплуатационными испытаниями и наблюдениями.

Следует отметить сравнительно высокие коэффициенты ускорения, достигнутые для изделий, разрушающихся от усталости. Это объясняется наличием многочисленных фундаментальных исследований нагруженности таких деталей и процессов накопления усталостных повреждений, что дало возможность уверенно выбирать параметры режимов испытаний с использованием высоких уровней напряжений.

Значительно осторожнее выбираются режимы испытаний изделий, подверженных изнашиванию или разрушающихся от износа в сочетании с усталостью. Интенсификация испытаний в таких случаях сдерживается чувствительностью процессов изнашивания к условиям в контакте сопряженных поверхностей; изменения нагрузок, скоростей скольжения, температуры, толщины и свойств слоя смазки, количества и свойств загрязняющих примесей и других факторов могут исказить результаты испытаний. Накопление опыта испытаний изделий определенного типа и назначения дает возможность оценить изделия до окончания испытаний.

Контрольные испытания на надёжность. Контрольные испытания не имеют целью прямое определение количественных значений отдельных показателей надёжности, а служат средством контроля соблюдения нормированных показателей надёжности по некоторым косвенным признакам. Такими признаками могут быть,

например, отсутствие отказов при испытаниях на протяжении заданного времени, предельные числа допустимых и недопустимых отказов для последовательных интервалов времени. В результате проведения контрольных испытаний можно лишь утверждать, что уровень надёжности данного объекта не ниже заданного.

Очевидно, задача контроля надёжности значительно проще задачи определительных испытаний, поэтому методы планирования, проведения и обработки результатов контрольных испытаний отработаны в большей степени. Рассмотрим два вида контрольных испытаний, наиболее распространённых в реальной практике.

Испытания, основанные на числе допустимых отказов, равном нулю

Испытаниям подвергаются N объектов. Продолжительность испытаний $t_u(r)$. Если при испытаниях не зафиксировано отказов, то объекты считаются удовлетворяющими требованиям надёжности. Расчётом определяется либо $t_u(r)$ при заданном N, либо N при заданном $t_u(r)$ по формулам:

$$N = \frac{t_p}{t_u}, \tag{5.1}$$

$$t_u = \frac{t_p}{N}, \tag{5.2}$$

где t_p – общая наработка объектов в период испытаний.

Испытания, основанные на последовательном анализе

Рассмотренный выше вид испытаний основан на обработке некоторого заранее запланированного объёма информации. Результат обработки сравнивается с заданным показателем надёжности, и на основе сравнения делается вывод либо о соответствии, либо о несоответствии полученных результатов требуемым.

Сокращения времени на контрольные испытания можно добиться, если использовать другой подход к планированию испытаний:

– в процессе планирования испытаний разбить их заранее на ряд последовательных этапов. На каждом из этапов анализировать результат и принимать одно из трех решений:

а) прекратить испытания, если есть основание считать, что объекты удовлетворяют требованиям надёжности;

б) прекратить испытания, если есть основание считать, что объекты не удовлетворяют требованиям надёжности;

в) продолжить испытания, если нет оснований для формулирования вывода о надёжности объектов:

– в основу обработки результатов испытаний положить не сравнение их с заданным показателем, а отнесение объектов к той или иной группе по показателю надёжности. При испытаниях на надёжность рекомендуется устанавливать две группы. К первой относят объекты, браковка которых может быть произведена с малой вероятностью α (риск поставщика или ошибка первого рода). Ко второй группе относят объекты, принятие которых может быть допущено с малой вероятностью β (риск потребителя или ошибка второго рода).

Испытания, построенные на таком подходе, называют испытаниями, основанными на последовательном анализе. Их характерными особенностями яввляются:

– назначение двух уровней надёжности, основанных на рисках α и β, устанавливаемых до проведения испытаний;

– назначение установленной последовательности этапов проведения испытаний, позволяющих заканчивать их в зависимости от получаемых результатов.

При решении вопроса об отнесении испытуемых объектов к той или иной группе допускаются ошибки первого α и второго β рода. Для того чтобы ошибки были в пределах заданных значений, необходимо выполнить следующие условия:

– если $y < \beta = (1 - \alpha)$, то объекты принимаются;

– если $y > (1 - \beta)$, то объекты не принимаются;

– если $\beta/(1 - \alpha) < y < (1 - \beta)/\alpha$, то испытания продолжаются.

По известным функциям распределения и средним наработкам на отказ $T_{0н}$ (нижний уровень) и $T_{0в}$ (верхний уровень) производится расчёт для заданных интервалов времени испытаний числа отказов, определяющих требования приемки и браковки.

Условие приемки определяется по формуле

$$n_{пр} \le \frac{\ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{T_{0_в}}{T_{0_н}}\right)} + \frac{\frac{1}{T_{0_н}} - \frac{1}{T_{0_в}}}{\ln\left[\frac{T_{0_в}}{T_{0_н}}\right]} \cdot t. \qquad (5.3)$$

Условие браковки определяется по формуле

$$n_{бр} \le \frac{\ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{T_{0_в}}{T_{0_н}}\right)} + \frac{\frac{1}{T_{0_н}} - \frac{1}{T_{0_в}}}{\ln\left[\frac{T_{0_в}}{T_{0_н}}\right]} \cdot t. \qquad (5.4)$$

При контроле конкретных показателей надёжности все отказы изделий, зафиксированные при испытании или эксплуатации, подразделяют на учитываемые и неучитываемые. При этом не учитывают отказы: зависимые, возникшие одновременно с независимыми; вызванные воздействием внешних факторов, не предусмотренных в ТЗ и ТУ на изделие; вызванные нарушениями со стороны обслуживающего персонала инструкций по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту.

При необходимости проводят предварительную обработку данных испытаний для выявления выпадающих значений, проверки однородности, независимости и вида распределения.

Обработка данных контрольных испытаний должна обеспечивать определение соответствия продукции требованиям нормативно-технических документов с указанием вероятностей ошибок при принятии решения о соответствии или несоответствии испытуемых изделий указанным требованиям.

Результаты испытаний оформляют и утверждают в установленном порядке протоколом (актом), в который включают:

– наименование продукции;

– код продукции по международному классификатору;

– код продукции по национальному классификатору;

– наименование предприятия-изготовителя, адрес (страна, город, почтовый индекс и др.);

– сведения о продукции (тип, марка, основные параметры и т. п.);

– цель испытаний;

– количество испытанных образцов (номер изделия, номер партии, дата изготовления);

– наименование предъявителя образцов для испытаний (наименование органа, номер и дата сопроводительного документа и др.);

– ссылку на программу и методику испытаний;

– перечень наблюдавшихся отказов и их классификацию;

– выявленные причины отказов (с указанием методов анализа) и показатели технологичности при техническом обслуживании и ремонте;

– обработанные результаты испытаний;

– выводы о соответствии опытных образцов изделий заданным требованиям и значения достигнутых показателей;

– выводы о правильности и достаточности номенклатуры критериев отказа и предельного состояния;

– рекомендации по доработке изделий с целью повышения или достижения заданного уровня показателей надёжности.

Испытания на надёжность серийных изделий проводят в составе периодических и типовых испытаний. Контрольные испытания на надёжность проводят по методике, содержащейся в технических условиях (разделы «Методы испытаний» и «Приемка»), или по отдельным методикам.

В методику проведения контрольных испытаний на надёжность в составе периодических испытаний дополнительно должны быть включены:

– периодичность проведения испытаний;

– метод и планы испытаний;

– число испытуемых изделий;

– правила отбора изделий в выборку для испытаний;

– режимы испытаний;

– перечень контролируемых параметров и периодичность их проверки;

– перечень необходимого испытательного и контрольного измерительного оборудования;

– номенклатура и значения параметров для решения о принятии или отбраковки испытуемых изделий;

– порядок учёта и статистического анализа отказов (предельных состояний);

– порядок выявления причин отказов;

– порядок проведения технического обслуживания и ремонта испытуемых изделий.

Периодичность контрольных испытаний на надёжность устанавливают в зависимости от контролируемых показателей и числа выпускаемых изделий, с учётом возможности завершения предыдущего цикла испытаний к началу очередного цикла и необходимого резерва времени для технического обслуживания и ремонта испытательного оборудования.

Если периодичность контрольных испытаний на надёжность установлена более одного года или постановка на испытания требуемого числа образцов невозможна, то допускается в обоснованных случаях (по согласованию с потребителем (заказчиком)) контролировать надёжность по результатам объединения информации, получаемой при испытаниях, с данными эксплуатации.

Критерии перехода к такому порядку контроля надёжности конкретных видов изделий должны быть приведены в нормативно-технических документах на указанные изделия.

5.2. Основы планирования эксперимента

Проведение многофакторных испытаний различного уровня невозможно без их предварительного научно обоснованного планирования. Рассмотрим основные элементы теории планирования эксперимента – классификацию и содержание экспериментальных планов и их анализ с точки зрения применения к испытаниям на надёжность.

Объект исследования. Для определения параметра оптимизации и выбора схемы планирования эксперимента предварительно изучают объект исследования на основе априорной информации, которую получают, изучая литературные данные и анализируя результаты ранее проведенных работ. При планировании эксперимента к объекту исследования предъявляют следующие требования:

– объект исследования должен удовлетворять требованию воспроизводимости. При многократном повторении эксперимента его результат имеет разброс значений, который характеризует воспроизводимость результата. Объект исследования удовлетворяет требованию воспроизводимости, если его многократное повторение дает результаты с разбросом значений, не превышающим некоторой заданной величины;

– объект должен быть управляемым, но практически нет абсолютно управляемых объектов. На реальный объект действуют как управляемые, так и неуправляемые факторы. Последние влияют на воспроизводимость результатов эксперимента и могут служить причиной её нарушения. Если требование воспроизводимости удовлетворяется, выявляют возможность проведения активного эксперимента, предусматривающего активное вмешательство в исследуемый процесс и выбор для каждого эксперимента управляемых факторов на тех уровнях, которые представляют интерес для исследования.

Объект, на котором возможен активный эксперимент, называют управляемым.

Параметр оптимизации. При планировании эксперимента важно правильно выбрать параметр оптимизации. Движение к оптимуму возможно, если выбран один параметр оптимизации, а другие выступают в качестве ограничений. Возможно построение обобщенного параметра как функции от множества исходных параметров. Параметр оптимизации должен быть количественным, доступным для измерения и должен выражаться одним числом. Если измерение параметра невозможно, то пользуются ранговой оценкой. Ранг – это оценка параметра оптимизации по заранее выбранной шкале: двухбалльной, пятибалльной, десятибалльной и т. п. Ранговый параметр имеет ограниченную дискретную область определения. В простейшем случае область содержит два значения: да – нет; хорошо – плохо; брак – годные детали и т. д. При прочих равных условиях предпочтение необходимо отдавать количественному измерению, так как ранговая оценка носит субъективный характер.

Параметр оптимизации должен быть однозначным в статистическом смысле, т. е. заданному сочетанию уровней факторов должно соответствовать одно (с точностью до ошибки эксперимента) значение параметра оптимизации; эффективным в статистическом смысле, т. е. определяться с наибольшей точностью, что позволяет сократить до минимума число параллельных экспериментов; существовать для всех состояний исследуемого объекта; иметь физический смысл.

Параметры оптимизации могут быть экономическими, технико-экономическими, технико-технологическими и другими. Экономическими являются прибыль, себестоимость, рентабельность. К технико-экономическим относят производительность, надёжность. Технико-технологическими параметрами являются механические, физические, физико-химические и некоторые другие характеристики изделия. Большинство параметров оптимизации прямо или косвенно связано с экономичностью производства или экономичностью эксплуатации изделия.

Факторы. Фактором называют независимую переменную величину, влияющую на параметр оптимизации. Каждый фактор имеет область определения – совокупность всех значений, которые может принимать фактор.

При исследовании процесса необходимо учитывать все существенные факторы. Если по каким-либо причинам влияние некоторых факторов невозможно учесть в эксперименте, то эти факторы должны быть стабилизированы на определенных уровнях в течение всего экспе-

римента. Уровнями называют значения факторов в эксперименте. Если число факторов велико, то необходимо отсеять те факторы, которые оказывают незначительное влияние на параметр оптимизации. Отсеивание несущественных факторов производят на основе априорного ранжирования или с помощью постановки отсеивающих экспериментов.

Факторы должны быть:

– управляемыми, т. е. позволяющими экспериментатору устанавливать их требуемые значения и поддерживать постоянными эти значения в течение эксперимента;

– непосредственно воздействующими на объект исследования, так как трудно управлять фактором, который является функцией других факторов;

– совместимыми, т. е. все комбинации уровней факторов должны быть осуществимы и безопасны;

– независимыми, т. е. позволяющими экспериментатору устанавливать требуемые уровни любого фактора независимо от уровней других факторов.

Модель (от *лат*. model – образец) – отображение: целевое; абстрактное или реальное, статическое или динамическое; конечное, упрощенное, приближенное; имеющее наряду с безусловно истинным условно-истинное, предположительно-истинное и ложное содержание; реализующееся и развивающееся в процессе его практического использования. Общее понятие модели включает в себя следующие дифференцированные понятия:

– *модель абстрактная* – идеальная конструкция; модель, построенная средствами мышления;

– *модель динамическая* – модель, отображающая процессы, происходящие в системе со временем, например, модели функционирования и развития;

– *модель знаковая* – реальная модель, имеющая абстрактное содержание; модель, условно подобная оригиналу;

– *модель классификационная* – простейший вид модели, в которой фиксируются только отношения тождественности или различия;

– *модель математическая* – абстрактная или знаковая модель, построенная средствами математики (например, в виде системы уравнений, графа, логической формулы и т. п.);

– *модель познавательная* – форма организации и представления знаний; средство соединения новых знаний с имеющимися;

– *модель прагматическая* – средство управления, организации практических действий; образец, эталон правильных действий (например, алгоритм) или их результата (например, модель цели);

– *модель реальная* (*вещественная, физическая, предметная*) – модель, построенная из реальных объектов; подобие реальной модели и оригинала может быть прямым, косвенным и условным;

– *модель состава системы* – модель, описывающая, из каких подсистем и элементов состоит система;

– *модель статическая* – модель, в которой отсутствует временной параметр;

– *модель структуры системы* – модель, описывающая все отношения (связи) между элементами модели состава системы;

– *модель функциональная* – модель, описывающая процессы, которые характеризуют систему как часть более общей, охватывающей её системы, т. е. связанные с назначением данной системы;

– *модель «чёрного ящика»* – модель, описывающая только входы и выходы системы, но не внутреннее устройство системы;

– *модель языковая* – любая конструкция на естественном языке, рассматриваемая как описание чего-либо (например, определение как модель определяемого; имя, название как обозначение называемого и т. д.).

Интегральным понятием является ***модель моделей*** – иерархия моделей; многоуровневая абстракция; число уровней в иерархии моделей связано с развитостью системы.

В процессе планирования эксперимента наиболее востребованы математические модели. Под математической моделью в этом случае понимают вид функции отклика $y = f(x_1, x_2, \ldots, x_k)$. Выбор модели зависит от задачи исследования и от предъявляемых требований к модели. Экстремальные задачи часто решают, используя шаговый метод. В этом случае модель должна удовлетворять требованиям этого метода. В основе шагового метода лежит предположение, что совокупность значений параметра оптимизации y, полученная при различных сочетаниях факторов x_i, образует поверхность отклика. Для наглядности представления о поверхности отклика при наличии y_{max} рассмотрим простейший случай, при котором число факторов равно двум – x_1 и x_2, показанным на рисунке 5.1. Для каждого фактора установлены два значения: максимальное и минимальное. Между этими значениями каждый фактор может изменяться непрерывно или дискретно.

Рассмотрим случайные процессы как модели сигналов, отражающих действующие факторы. Имеется несколько различных подходов к тому, как вводить вероятностную меру на множестве реализаций. Для инженерных приложений оказывается удобным определение случайного процесса как такой функции времени $x(t)$, значение которой в каждый данный момент является случайной величиной.

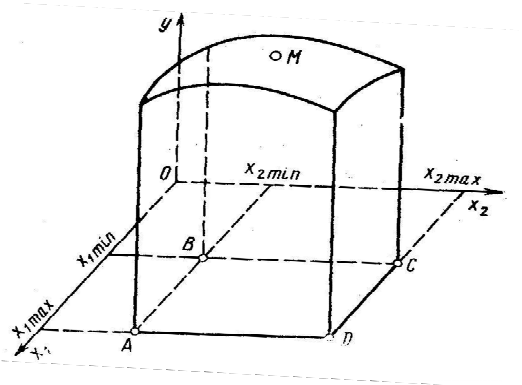


Рис. 5.1 – Изображение поверхности отклика

Случайная величина полностью характеризуется распределением вероятностей, например плотностью $P_1(x_1/t_1)$; однако, чтобы охарактеризовать случайный процесс, нужно описать, связаны ли (и если да, то как) значения реализации, разделенные некоторыми интервалами времени. Так как связь только двух таких значений, описываемая распределением второго порядка $P_2(x_1, x_2/t_1, t_2)$, может неполно характеризовать процесс в целом, вводят распределения третьего, четвёртого, ..., n-го порядков: $P_n(x_1,\ldots,x_n/t_1,\ldots,t_n)$. В конкретных задачах обычно ясно, до какого порядка следует доходить в описании процесса.

Классы случайных процессов. Необходимость моделирования самых разнообразных сигналов приводит к построению частных моделей случайных процессов, т. е. наложению дополнительных ограничений на параметры распределений и на сами распределения. Перечислим наиболее важные классы случайных процессов.

Непрерывные дискретные по времени процессы. Случайный процесс с непрерывным временем характеризуется тем, что его реализации определяются для всех моментов из некоторого (конечного

или бесконечного) интервала T параметра t. Дискретный по времени процесс задается на дискретном ряде точек временной оси (обычно равноотстоящих).

Непрерывные и дискретные по информативному параметру процессы. Эти процессы различаются в зависимости от того, из какого (непрерывного или дискретного) множества принимает значение реализация x случайной величины X.

Стационарные и нестационарные процессы. Так называются процессы в зависимости от постоянства или изменчивости их статистических характеристик. Случайный процесс называется *стационарным в узком смысле,* если для любого n конечномерные распределения вероятностей не изменяются со временем, т. е. при любом m выполняется условие

$$P_n\left(x_1,\ldots,x_n / t_1+\tau,t_2+\tau,\ldots,t_n+\tau\right)=P_n\left(x_1,\ldots,x_n / t_1,t_2,\ldots,t_n\right). \quad (5.5)$$

Если же условие независимости от времени выполняется только для первых двух моментов (среднего и функции автокорреляции), то процесс называется *стационарным в широком смысле*.

Эргодические и неэргодические процессы. На практике при описании случайных величин вместо рассмотрения их распределений часто ограничиваются только их числовыми характеристиками, обычно статистическими моментами. В тех случаях, когда распределение неизвестно, моменты (и другие числовые характеристики) можно оценить статистически.

Перенос такой практики на произвольные случайные процессы требует не только учёта зависимости отстоящих друг от друга («разнесенных») во времени значений, но и наложения дополнительных требований. Требование совпадения величин, получающихся при усреднении по ансамблю (т. е. при фиксированном времени) и при усреднении по времени (точнее, по одной реализации), и называется *условием эргодичности*. Это требование можно толковать и как совпадение результатов *усреднения по любой реализации.* Как и для стационарности, можно различать эргодичность в узком и широком смысле.

В процессе планирования эксперимента в различной степени находят применение все дифференцированные виды моделей. Однако чаще других используются математические и реальные (физические, предметные) модели.

Организация многофакторных испытаний объектов на надёжность (МФИН) является, прежде всего, вопросом оптимального обзора пространства факторов.

Чаще всего постановка эксперимента осуществляется для решения одной из двух основных задач. *Первую задачу называют экстремальной*. Она заключается в отыскании условий процесса, обеспечивающих получение оптимального значения выбранного параметра. Признаком экстремальных задач является условие поиска экстремума некоторой функции, аргументами которой являются действующие факторы. Эксперименты, которые ставят для решения задач оптимизации, называют экстремальными.

Вторую задачу называют интерполяционной. Её цель – получение интерполяционной формулы для предсказаний значений изучаемого параметра, зависящего от ряда факторов. Для решения экстремальной или интерполяционной задачи необходимо иметь математическую модель исследуемого объекта. Модель объекта получают, используя результаты опытов. При исследовании многофакторного процесса постановка всех возможных опытов для получения математической модели связана с высокой трудоемкостью эксперимента, поскольку их число весьма велико. Задача планирования состоит в установлении минимально необходимого числа экспериментов и условий их проведения, в выборе методов математической обработки результатов и последующем принятии решений. Планирование экспериментов значительно сокращает их число, необходимое для получения модели процесса.

Частным случаем планирования эксперимента является планирование экстремального эксперимента, т. е. процесс выбора их числа и условий проведения, минимально необходимых для нахождения экстремальных экспериментов с помощью метода Бокса – Уилсона, называемого методом крутого восхождения. При планировании экстремального эксперимента цель исследования должна быть чётко сформулирована и должна иметь количественную оценку. Характеристику цели, заданную количественно, называют *параметром оптимизации*. Параметр оптимизации является откликом на воздействие факторов, определяющих поведение процесса. Результаты эксперимента используют для получения математической модели исследуемого процесса. Математическая модель – система математических соотношений, описывающих изучаемый процесс или явление. При планировании эксперимента под математической моделью часто понимают уравнение, связывающее параметр оптимизации с факторами. Такое уравнение называют функцией отклика.

При постановке экстремальных экспериментов на первом этапе находят область оптимума. На втором этапе стремятся получить более полное представление о поверхности отклика в области оптимума. Решение экстремальной задачи предусматривает получение функции отклика и нахождение с помощью её оптимальных условий протекания процесса. В общем виде функция отклика, являющаяся и параметром оптимизации η, может быть представлена зависимостью

$$\eta = f(x_1, x_2 \ldots, x_k), \tag{5.6}$$

где x_1, x_2 …, x_k – независимые переменные факторы.

Если функция отклика известна, то оптимальные условия процесса находят аналитически, без постановки эксперимента. Однако часто приходится решать экстремальные задачи при неполном знании механизма процесса. В этом случае зависимость функции отклика неизвестна, и поэтому вынуждены ограничиваться её представлением, например, полиномом вида

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \ldots, \tag{5.7}$$

где β_0, β_1, … – коэффициенты регрессии при соответствующих переменных.

По результатам эксперимента определяют выборочные коэффициенты регрессии b_0, b_1, b_2, b_{12}, …, которые являются лишь оценками теоретических коэффициентов регрессии β_0, β_1, β_2, β_{12}, … . Уравнение регрессии, полученное на основании экспериментов и представляющее собой выборочную оценку y функции отклика η, может быть записано в виде формулы

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + \ldots . \tag{5.8}$$

На первом этапе планирования эксперимента для определения направления движения к оптимуму и крутого восхождения по поверхности отклика функцию отклика выражают полиномом первой степени в виде формулы

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \ldots + b_k x_k . \tag{5.9}$$

Для определения коэффициентов уравнения (5.9) достаточно реализовать факторный эксперимент типа 2^k, где k – число факторов. Планы экспериментов типа 2^k называют *планами первого порядка*.

Крутое восхождение заканчивают после достижения области оптимума. Область оптимума чаще всего удается описать полиномом второй степени:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + ... + b_k x_k + b_{12} x_1 x_2 + ... + b_{(k-1)k} x_{(k-1)} x_k + b_{11} x_1^2 + ... + b_{kk} x_k^2. \quad (5.10)$$

Чтобы определить все коэффициенты уравнения (5.10), необходимо реализовать план эксперимента, в котором каждый фактор варьируется не менее чем на трех уровнях. Планы эксперимента, позволяющие оценить коэффициенты полинома второй степени, называют *планами второго порядка.*

Шаговый метод основан на предположении, что поверхность отклика является гладкой и имеет единственный оптимум. Поверхность отклика расположена в (k + 1)-мерном пространстве, которое называют факторным. При большом числе факторов это пространство является многомерным, и геометрическая интерпретация функции отклика становится невозможной. Для описания в многомерном пространстве поверхности отклика пользуются языком алгебры. Гладкость поверхности отклика и наличие на ней одной точки оптимума позволяют двигаться к последней в любом направлении, независимо от исходной точки. При шаговом методе каждому фактору придают два значения: максимальное и минимальное. Эти значения составляют только часть возможных значений факторов. На первом этапе реализации шагового метода выбирается лишь какая-то подобласть из области возможных значений факторов, и в этой подобласти ставится эксперимент.

На основании результатов этого эксперимента строится первая модель, по которой предсказываются отклики для значений факторов, выходящих за пределы выбранной подобласти. Чем дальше от этой подобласти лежит точка, определяющая значения факторов, тем с меньшей точностью путём экстраполяции можно предсказать значение отклика для этой точки. Поэтому экстраполяцию производят вблизи подобласти эксперимента и используют её для выбора условий проведения следующего эксперимента, т. е. устанавливают новые интервалы значений факторов или выбирают новую подобласть факторного пространства. Поставив новый эксперимент, строят вторую модель и на основании её делают следующий шаг в направлении к оптимуму. В этом и заключается сущность шагового метода.

Исходя из сущности этого метода к модели предъявляется главное требование, заключающееся в приспособленности модели для «предсказания» направления дальнейших опытов с требуемой точностью. Модель, удовлетворяющую этому требованию, называют адек-

ватной. Если имеется несколько удовлетворяющих указанному требованию моделей, то из них выбирается наиболее простая.

Наиболее простой моделью является полином. Полином линеен относительно неизвестных коэффициентов, что упрощает обработку наблюдений. Полином может быть первой, второй и более высокой степени. Коэффициенты полинома вычисляют по результатам экспериментов. Чем больше коэффициентов в полиноме, тем большее количество экспериментов необходимо поставить для их определения. Число коэффициентов зависит от степени полинома: чем выше степень, тем больше число коэффициентов. На первом этапе планирования – при определении направления движения к оптимуму и крутого восхождения по поверхности отклика – наиболее целесообразно неизвестную функцию отклика аппроксимировать полиномом первой степени. Аппроксимация – это замена одной функции другой функцией, в каком-то смысле эквивалентной первой. Полином первой степени имеет минимальное число коэффициентов при данном числе факторов и содержит необходимую информацию о направлении градиента, под которым понимают направление наискорейшего улучшения параметра оптимизации. После достижения путём постепенного перемещения по поверхности отклика подобласти, в которой лежит точка оптимума, иногда для более полного описания этой подобласти переходят от полинома первой степени к полиному второй степени. Полином первой степени в общем виде выражается уравнением

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + ... + b_k x_k + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + ... + b_{12...k} x_1 x_2 ... x_k . \quad (5.11)$$

Для трех факторов это уравнение (5.11) имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 . \quad (5.12)$$

Полином второй степени для трех факторов имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (5.13)$$

Полный факторный эксперимент. К оптимизации приступают при наличии некоторых результатов предварительных исследований изучаемого объекта. Решение задачи оптимизации начинают с выбора области эксперимента. Выбор этой области производят на основе анализа априорной информации. В области эксперимента устанавливают основные уровни и интервалы варьирования факторов. *Основ-*

ным, *или нулевым*, *уровнем фактора* называют его значение, принятое за исходное в плане эксперимента. Основные уровни выбирают таким образом, чтобы их сочетание отвечало значению параметра оптимизации, по возможности более близкому к оптимальному. Каждое сочетание уровней факторов является многомерной точкой в факторном пространстве. Сочетание основных уровней принимают за исходную точку для построения плана эксперимента. Построение плана эксперимента состоит в выборе экспериментальных точек, симметричных относительно исходной точки (центра плана).

Интервалом варьирования фактора называют индивидуальное для каждого фактора число, прибавление которого к основному уровню дает верхний уровень фактора, а вычитание – нижний. Интервал варьирования не может быть выбран меньше той ошибки, с которой экспериментатор фиксирует уровень фактора, а также не может быть настолько большим, чтобы верхний или нижний уровни выходили за пределы области определения фактора. При этом необходимо учитывать, что увеличение интервалов варьирования затрудняет возможность линейной аппроксимации функции отклика.

Для удобства записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных уровни факторов кодируют. В кодированном виде верхний уровень обозначают +1, нижний – 1, а основной 0. Кодированное значение фактора x_i определяют по зависимости

$$x_i = \frac{\left(\widetilde{x}_i - \widetilde{x}_i^0\right)2}{\varepsilon_i}, \qquad (5.14)$$

где $\widetilde{x}_i$ – натуральное значение i-го фактора; $\widetilde{x}_i^0$ – натуральное значение основного уровня i-го фактора; ε_i – интервал варьирования i-го фактора.

При кодировании качественных факторов, имеющих два уровня, верхний уровень обозначается +1, а нижний –1. *Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называют полным факторным экспериментом.* Если число уровней каждого фактора m, число факторов k, число всех сочетаний уровней факторов N, то число экспериментов определяется зависимостью

$$N = m^k. \qquad (5.15)$$

Цель первого этапа планирования экстремального эксперимента – получение линейной модели. Он предусматривает варьирование

факторов на двух уровнях. Возможное количество сочетаний уровней факторов в этом случае равно 2^k.

Факторный эксперимент осуществляют с помощью *матрицы планирования*, в которой используют кодированные значения факторов. Так, например, для двух факторов полный факторный эксперимент типа 2^k можно представить матрицей, приведенной в таблице 5.3. Число строк в матрице равно количеству экспериментов. Знаками +1 и –1 обозначают уровни факторов x_1 и x_2. Значения функции отклика, полученные при выполнении экспериментов, обозначены через y_1, y_2, y_3 и y_4.

Для упрощения записи условий эксперимента в матрице планирования вместо +1 пишут только «+», а вместо –1 только «–».

Для движения по градиенту необходима линейная модель. При $k = 2$ моделью будет уравнение регрессии вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2. \qquad (5.16)$$

Значения коэффициентов в этом уравнении определяют с помощью значений функции отклика, полученных в результате экспериментов.

Под числом степеней свободы в статистике понимают разность между числом опытов и количеством коэффициентов модели, вычисленных по результатам этих экспериментов независимо друг от друга. Число степеней свободы f при линейной модели определяется по зависимости

$$f = N – (k + 1), \qquad (5.17)$$

где N – число экспериментов; k – число факторов.

Таблица 5.3 – Матрица факторного эксперимента 2^2

Номер эксперимента	x_1	x_2	y
1	–	–	y_1
2	+	–	y_2
3	–	+	y_3
4	+	+	y_4

Таблица 5.4 – Матрица планирования

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y
1	+	–	–	+	y_1
2	+	+	–	–	y_2
3	+	–	+	–	y_3
4	+	+	+	+	y_4

Так, например, при двух факторах число N экспериментов равно четырём, а для определения коэффициентов уравнения регрессии $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$ достаточно результатов трёх. Таким образом, число степеней свободы в рассматриваемом случае, равное единице, может быть использовано для проверки адекватности модели. Величина и знак коэффициента указывают на вклад данного фактора в общий результат при переходе с нулевого на верхний или нижний уровень фактора.

Линейным называют эффект, характеризующий линейную зависимость параметра оптимизации от соответствующего фактора. Эффектом взаимодействия называют эффект, характеризующий совместное влияние нескольких факторов на параметр оптимизации. Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценить линейные эффекты и все эффекты взаимодействия. Для полного факторного эксперимента типа 2^2 уравнение регрессии с учётом эффектов взаимодействия можно представить зависимостью

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \qquad (5.18)$$

Для этого эксперимента матрица планирования приведена в таблице 5.4. В этой матрице содержится столбец фиктивной переменной x_0. Он вводится для оценки свободного члена b_0. Столбец x_1x_2 получен перемножением столбцов x_1 и x_2. Он введён для расчёта коэффициента b_{12}. При $k = 2$ построение матриц полного факторного эксперимента не вызывает затруднений, так как все возможные сочетания уровней факторов легко найти простым перебором. При увеличении числа факторов количество возможных сочетаний уровней быстро возрастает, поэтому возникает необходимость в некоторых приемах построения матриц. Рассмотрим два наиболее простых приема. Первый прием основан на правиле чередования знаков. В первом столбце (x_1) знаки чередуются поочередно, во втором они чередуются через 2, в третьем – через 4, в четвёртом – через 8, в пятом – через 16 и т. д. по степеням двойки.

Второй прием основан на последовательном достраивании матрицы. Для этого при добавлении нового фактора необходимо повторить комбинации уровней исходного плана сначала при значении нового фактора на верхнем уровне, а затем на нижнем. Последовательное достраивание матрицы при увеличении числа факторов от 2 до 5 показано в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Схема построения матрицы при увеличении числа факторов от 2 до 5

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	2	3	4	5	6	7
1	+	+	+	+	+	+
2	+	–	+	+	+	+
3	+	+	–	+	+	+
4	+	–	–	+	+	+
5	+	+	+	–	+	+
6	+	–	+	–	+	+
7	+	+	–	–	+	+
8	+	–	–	–	+	+
9	+	+	+	+	–	+
10	+	–	+	+	–	+
11	+	+	–	+	–	+
12	+	–	–	+	–	+
13	+	+	+	–	–	+
14	+	–	+	–	–	+
15	+	+	–	–	–	+
16	+	–	–	–	–	+
17	+	+	+	+	+	–
18	+	–	+	+	+	–
19	+	+	–	+	+	–
20	+	–	–	+	+	–
21	+	+	+	–	+	–
22	+	–	+	–	+	–
23	+	+	–	–	+	–
24	+	–	–	–	+	–
25	+	+	+	+	–	–
26	+	–	+	+	–	–
27	+	+	–	+	–	–
28	+	–	–	+	–	–
29	+	+	+	–	–	–
30	+	–	+	–	–	–
31	+	+	–	–	–	–
32	+	–	–	–	–	–

Дробный факторный эксперимент. При большом количестве факторов ($k > 3$) проведение полного факторного эксперимента связано с большим числом экспериментов, значительно превосходящим число коэффициентов линейной модели. Если при получении модели можно ограничиться линейным приближением, т. е. получить адекватную модель в виде полинома $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + ... + b_kx_k$, то число экспериментов можно существенно сократить в результате использования дробного факторного эксперимента. Так, например, в полном факторном эксперименте типа 2^2 при линейном приближении коэффициент регрессии b_{12} можно принять равным нулю, а столбец x_1x_2 матрицы (табл. 5.6) использовать для третьего фактора x_3.

Таблица 5.6 – Матрица планирования

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3 (x_1x_2)	y
1	+	+	+	+	y_1
2	+	–	+	–	y_2
3	+	+	–	–	y_3
4	+	–	–	+	y_4

В этом случае линейная модель будет определяться уравнением $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$. Для определения коэффициентов этого уравнения достаточно провести четыре эксперимента вместо восьми в полном факторном эксперименте типа 2^3. План эксперимента, предусматривающий реализацию половины экспериментов полного факторного эксперимента, называют полурепликой. При увеличении числа факторов ($k > 3$) возможно применение реплик большей дробности. Дробной репликой называют план эксперимента, являющийся частью плана полного факторного эксперимента. Дробные реплики обозначают зависимостью 2^{k-p}, где p – число линейных эффектов, приравненных к эффектам взаимодействия. При $p = 1$ получают полуреплику; при $p = 2$ получают 1/4-реплику; при $p = 3$ получают 1/8-реплику и т. д. по степеням двойки. Так, например, если в полном факторном эксперименте 2^3 (табл. 5.7) один из эффектов взаимодействия (x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, $x_1x_2x_3$) заменить четвёртым фактором x_4, то получим полуреплику 2^{4-1} от полного факторного эксперимента 2^4. Если два эффекта взаимодействия заменить факторами x_4 и x_5, то получим 1/4-реплику 2^{5-2} от полного факторного эксперимента 2^5.

Таблица 5.7 – Матрица полного факторного эксперимента типа 2^3

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	–	–	+	+	–	–	+	y_1
2	+	+	–	+	–	+	–	–	y_2
3	+	–	+	+	–	–	+	–	y_3
4	+	+	+	+	+	+	+	+	y_4
5	+	–	–	–	+	+	+	–	y_5
6	+	+	–	–	–	–	+	+	y_6
7	+	–	+	–	–	+	–	+	y_7
8	+	+	+	–	+	–	–	–	y_8

Можно получать ⅛-реплику от полного факторного эксперимента 2^6, заменив три эффекта взаимодействия факторами x_4, x_5 и x_6. Если заменить четыре эффекта взаимодействия факторами x_4, x_5, x_6 и x_7, то получим, 1/16-реплику 2^{7-4} от полного факторного эксперимента 2^7.

Реплики, которые используют для сокращения числа экспериментов в 2^m раз, где $m = 1, 2, 3$ ..., называют регулярными.

В связи с тем, что в дробных репликах часть взаимодействий заменена новыми факторами, найденные коэффициенты уравнения регрессии будут являться совместными оценками линейных эффектов и эффектов взаимодействия. Так, например, если в матрице (таблица 5.6) вычислим элементы столбцов для произведений x_1x_3 и x_2x_3, то увидим, что элементы столбца x_1x_2 совпадают с элементами столбца x_2, а элементы столбца x_2x_3 – с элементами столбца x_1. Следовательно, коэффициенты b_1, b_2, b_3 будут оценками совместных эффектов, а именно $b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}$; $b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}$; $b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}$.

Коэффициент b_1 является оценкой влияния фактора x_1 и парного взаимодействия x_2x_3 на функцию отклика. Влияние фактора x_1 в этом случае характеризуется величиной β_1, а влияние взаимодействия – величиной β_{23}. Оценки, в которых невозможно разделить линейный эффект и эффект взаимодействия, называют смешанными. Линейные эффекты рекомендуется смешивать, прежде всего, с теми взаимодействиями, которые согласно априорной информации незначимы.

Число несмешанных линейных эффектов в дробной реплике называют её разрешающей способностью.

Часто приходится решать задачи, в которых заранее можно полагать, что эффекты взаимодействия хотя и малы по сравнению с линейными, но всё же не равны нулю. В таких случаях необходимо за-

ранее определить, какие коэффициенты являются смешанными оценками. Тогда в зависимости от условий поставленной задачи подбирается такая дробная реплика, с помощью которой можно извлечь максимальную информацию из эксперимента.

Прямая оценка разрешающей способности дробной реплики затруднена. Поэтому дробные реплики задают с помощью генерирующих соотношений. Генерирующим называют соотношение, которое показывает, какое из взаимодействий принято незначимым и заменено новым фактором.

План типа 2^{3-1} может быть представлен двумя полурепликами (табл. 5.8), которые задаются одним из следующих генерирующих соотношений: $x_3 = x_1x_2$; $x_3 = -x_1x_2$.

Генерирующие соотношения умножим на новую независимую переменную x_3: $x_3^2 = x_1x_2x_3 : x_3^2 = -x_1x_2x_3$.

Таблица 5.8 – Две полуреплики плана типа 2^{3-1}

Номер эксперимента	$x_3 = x_1x_2$			Номер эксперимента	$x_3 = -x_1x_2$		
	x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3
1	–	+	–	1	–	+	+
2	+	+	+	2	+	+	–
3	–	–	+	3	–	–	–
4	+	–	–	4	+	–	+

Поскольку всегда $x_i^2 = 1$, получим следующие соотношения:

$$1 = x_1x_2x_3; \quad 1 = -x_1x_2x_3. \tag{5.19}$$

В результате умножения генерирующего соотношения на новую переменную получают так называемый определяющий контраст. Для указанных выше полурепликпределяющими контрастами будут зависимости (5.20). Зная определяющий контраст, можно найти соотношения, задающие совместные оценки. Для этого необходимо умножить независимые переменные x_1, x_2 и x_3 на определяющий контраст. Умножая определяющие контрасты (5.20) на x_1, получим соотношения:

$$x_1 \cdot 1 = x_1^2x_2x_3; \quad x_1 \cdot 1 = -x_1^2x_2x_3.$$

Так как $x_1^2 = 1$, то $x_1 = x_2x_3$; $x_1 = -x_2x_3$.

Умножая определяющие контрасты на x_2 и x_3, получаем следующие соотношения:

$$x_2 = x_1x_3; \; x_2 = -x_1x_3; \; x_3 = x_1x_2; \; x_3 = -x_1x_2. \tag{5.20}$$

Это означает, что коэффициенты регрессии будут оценками:

$$\begin{aligned} b_1 &\to \beta_1 + \beta_{23}; \quad b_1 \to \beta_1 - \beta_{23}; \\ b_2 &\to \beta_2 + \beta_{13}; \quad b_2 \to \beta_2 - \beta_{13}; \\ b_3 &\to \beta_3 + \beta_{12}; \quad b_3 \to \beta_3 - \beta_{12}. \end{aligned} \tag{5.21}$$

Полуреплика 2^{4-1} может быть задана генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2x_3$. Матрица планирования этой полуреплики представлена в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Полуреплика 2^{4-1} с определяющим контрастом $1 = x_1x_2x_3x_4$

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	+	–	–	+	+	y_1
2	+	+	–	+	–	y_2
3	+	–	+	+	–	y_3
4	+	+	+	+	+	y_4
5	+	–	–	–	–	y_5
6	+	+	–	–	+	y_6
7	+	–	+	–	+	y_7
8	+	+	+	–	–	y_8

Определяющим контрастом полуреплики является соотношение

$$1 = x_1x_2x_3x_4. \tag{5.22}$$

Совместные оценки будут определяться из соотношений:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_2x_3x_4 \quad b_1 \to \beta_1 + \beta_{234}; \\ x_2 &= x_1x_3x_4 \quad b_2 \to \beta_2 + \beta_{134}; \\ x_3 &= x_1x_2x_4 \quad b_3 \to \beta_3 + \beta_{124}; \\ x_4 &= x_1x_2x_3 \quad b_4 \to \beta_4 + \beta_{123}; \\ x_1x_2 &= x_2x_4 \quad b_{12} \to \beta_{12} + \beta_{34}; \\ x_1x_3 &= x_3x_4 \quad b_{13} \to \beta_{13} + \beta_{24}; \\ x_1x_4 &= x_2x_3 \quad b_{14} \to \beta_{14} + \beta_{23}. \end{aligned} \tag{5.23}$$

Полуреплика 2^{4-1} может быть также задана генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2$. Матрица планирования этой полуреплики представлена в таблице 5.10. Определяющим контрастом полуреплики является соотношение $1 = x_1x_2x_4$.

Таблица 5.10 – Полуреплика 2^{4-1} с определяющим контрастом $1 = x_1x_2x_4$

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	+	–	–	+	+	y_1
2	+	+	–	+	–	y_2
3	+	–	+	+	–	y_3
4	+	+	+	+	+	y_4
5	+	–	–	–	+	y_5
6	+	+	–	–	–	y_6
7	+	–	+	–	–	y_7
8	+	+	+	–	+	y_8

Совместные оценки в этом случае будут определяться из соотношений:

$$\begin{aligned}
x_1 &= x_2x_4 & b_1 &\to \beta_1 + \beta_{24};\\
x_2 &= x_1x_4 & b_2 &\to \beta_2 + \beta_{14};\\
x_3 &= x_1x_2x_3x_4 & b_3 &\to \beta_3 + \beta_{1234};\\
x_4 &= x_1x_2 & b_4 &\to \beta_4 + \beta_{12};\\
x_1x_3 &= x_2x_3x_4 & b_{13} &\to \beta_{13} + \beta_{234};\\
x_2x_3 &= x_1x_3x_4 & b_{23} &\to \beta_{23} + \beta_{134};\\
x_3x_4 &= x_1x_2x_3 & b_{34} &\to \beta_{34} + \beta_{123}.
\end{aligned} \qquad (5.24)$$

В практических задачах тройные и более высокого порядка взаимодействия значительно чаще, чем двойные, могут быть равными нулю, и ими обычно можно пренебречь. Полуреплика 2^{4-1}, заданная генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2x_3$, позволяет получить раздельные оценки четырёх линейных эффектов и три совместные оценки парных взаимодействий. В этом случае раздельными оценками будут b_1, b_2, b_3 и b_4, так как тройными взаимодействиями β_{234}, β_{134}, β_{124} и β_{123} вследствие их незначимости можно пренебречь. В полуреплике, заданной генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2$, три линейных эффекта, а именно b_1, b_2, b_4, оказались смешанными с парными взаимодействиями. Разрешающая способность полуреплики, заданной генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2x_3$, получилась значительно выше, чем у полуреплики, заданной генерирующим соотношением $x_4=x_1x_2$. Следовательно, разрешающая способность полуреплики зависит от генерирующего соотношения, которым она задана.

Для оценки разрешающей способности реплик большой дробности (¼, ⅛ и т. д.) используют обобщающие определяющие контрасты. ¼-реплика 2^{5-2} может быть задана следующими генерирующими соотношениями: $x_4 = x_1x_2x_3$, $x_5 = x_2x_3$. Матрица планирования этой реплики представлена в таблице 5.11.

Определяющими контрастами реплики являются соотношения:

$$1 = x_1x_2x_3x_4; \quad 1 = x_2x_3x_5. \tag{5.25}$$

Перемножив определяющие контрасты, получим третье соотношение:

$$1 = x_1x_4x_5. \tag{5.26}$$

Полная характеристика разрешающей способности рассматриваемой реплики будет определяться обобщающим определяющим контрастом, имеющим вид $1 = x_1x_2x_3x_4 = x_2x_3x_5 = x_1x_4x_5$.

Таблица 5.11 – Матрица планирования 2^{5-2}

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
1	+	+	+	–	–	–	y_1
2	+	–	+	–	+	–	y_2
3	+	–	–	–	+	+	y_3
4	+	+	–	–	–	+	y_4
5	+	–	+	+	+	+	y_5
6	+	+	+	+	–	+	y_6
7	+	+	–	+	–	–	y_7
8	+	–	–	+	+	–	y_8

Схему смешивания оценок находим последовательным умножением обобщающего определяющего контраста на x_1, x_2, x_3 и т. д. по формуле

$$\begin{aligned}
x_1 &= x_2x_3x_4 = x_1x_2x_3x_5 = x_4x_5 & b_1 &\to \beta_1 + \beta_{234} + \beta_{1235} + \beta_{45};\\
x_2 &= x_1x_3x_4 = x_3x_5 = x_1x_2x_4x_5 & b_2 &\to \beta_2 + \beta_{134} + \beta_{35} + \beta_{1245};\\
x_3 &= x_1x_2x_4 = x_2x_5 = x_1x_3x_4x_5 & b_3 &\to \beta_3 + \beta_{124} + \beta_{25} + \beta_{1345};\\
x_4 &= x_1x_2x_3 = x_2x_3x_4x_5 = x_1x_5 & b_4 &\to \beta_4 + \beta_{123} + \beta_{2345} + \beta_{15};\\
x_5 &= x_1x_2x_3x_4x_5 = x_2x_3 = x_1x_4 & b_5 &\to \beta_5 + \beta_{12345} + \beta_{23} + \beta_{14};\\
x_1x_2 &= x_3x_4 = x_1x_3x_5 = x_2x_4x_5 & b_{12} &\to \beta_{12} + \beta_{34} + \beta_{135} + \beta_{245};\\
x_1x_3 &= x_2x_4 = x_1x_2x_5 = x_3x_4x_5 & b_{13} &\to \beta_{13} + \beta_{24} + \beta_{125} + \beta_{345}.
\end{aligned} \tag{5.27}$$

Для 1/16 реплики генерирующими соотношениями являются

$$x_4 = x_1x_2x_3;\ \ x_5 = x_1x_2;\ \ x_6 = x_1x_3;\ \ x_7 = x_2x_3. \qquad (5.28)$$

Матрица планирования этой реплики представлена в таблице 5.12.

Определяющими контрастами реплики будут соотношения:

1) $1 = x_1x_2x_3x_4$;

2) $1 = x_1x_2x_5$;

3) $1 = x_1x_3x_6$;

4) $1 = x_2x_3x_7$.

Если попарно перемножить определяющие контрасты 1×2; 1×3; 1×4; 2×3; 2×4; 3×4, то получим отношения:

$$1 = x_3x_4x_5;\ 1 = x_2x_4x_6;\ 1 = x_1x_4x_7;$$
$$1 = x_2x_3x_5x_6;\ 1 = x_1x_3x_5x_7;\ 1 = x_1x_2x_6x_7. \qquad (5.29)$$

Произведения определяющих контрастов по три: 1×2×3; 1×2×4; 2×3×4; 1×3×4 – будут равны отношениям:

$$1 = x_1x_4x_5x_6;\ 1 = x_2x_4x_5x_7;\ \ 1 = x_5x_6x_7;\ 1 = x_3x_4x_6x_7. \qquad (5.30)$$

Умножая определяющие контрасты по четыре, получим $1 = x_1x_2x_3x_4x_5x_6x_7$.

Таблица 5.12 – Матрица планирования 2^{7-4}

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	y
1	+	+	–	+	–	–	+	–	y_1
2	+	–	–	+	+	+	–	–	y_2
3	+	–	+	+	+	+	+	+	y_3
4	+	+	+	+	–	–	–	+	y_4
5	+	–	–	–	+	–	–	+	y_5
6	+	+	–	–	–	+	+	+	y_6
7	+	+	+	–	–	+	–	–	y_7
8	+	–	+	–	+	–	+	–	y_8

Чтобы полностью характеризовать разрешающую способность данной реплики, запишем обобщающий определяющий контраст

$$1 = x_1x_2x_3x_4 = x_1x_2x_5 = x_1x_3x_6 = x_2x_3x_7 = x_3x_4x_5 = x_2x_4x_6 = x_1x_4x_7 = x_2x_3x_5x_6 =$$
$$x_1x_3x_5x_7 = x_1x_2x_6x_7 = x_1x_4x_5x_6 = x_2x_4x_5x_7 = x_5x_6x_7 = x_3x_4x_6x_7 = x_1x_2x_3x_4x_5x_6x_7.$$

Если эффектами взаимодействия, начиная с тройных, можно пренебречь, то коэффициенты будут оценками:

$$\begin{aligned} &b_1 \to \beta_1 + \beta_{25} + \beta_{36} + \beta_{47}; \quad b_2 \to \beta_2 + \beta_{15} + \beta_{37} + \beta_{46}; \\ &b_3 \to \beta_3 + \beta_{16} + \beta_{27} + \beta_{45}; \quad b_4 \to \beta_4 + \beta_{35} + \beta_{26} + \beta_{17}; \\ &b_5 \to \beta_5 + \beta_{12} + \beta_{34} + \beta_{67}; \quad b_6 \to \beta_6 + \beta_{13} + \beta_{24} + \beta_{57}; \\ &b_7 \to \beta_7 + \beta_{23} + \beta_{14} + \beta_{56}. \end{aligned} \tag{5.31}$$

Таким образом, получаем весьма сложную систему смешивания. Все линейные эффекты оказались смешанными с несколькими парными взаимодействиями, поэтому разрешающая способность этой дробной реплики очень низкая. Пользоваться такой репликой можно лишь в том случае, если все парные взаимодействия близки к нулю.

Выбор дробной реплики зависит от конкретной задачи. Для получения линейной модели рекомендуют выбирать дробные реплики с возможно большей разрешающей способностью, т. е. реплики, у которых линейные эффекты смешаны с эффектами взаимодействия, близкими к нулю. При выборе дробной реплики важно учитывать насыщенность плана, т. е. соотношение между числом опытов и числом коэффициентов, определяемых по результатам этих экспериментов. Дробная реплика, полученная заменой всех эффектов взаимодействия новыми факторами, называется насыщенной. Применение насыщенных планов требует минимального числа экспериментов. Число экспериментов в матрице насыщенной дробной реплики равно числу коэффициентов линейной модели. Гипотезу адекватности модели в этом случае проверить невозможно, так как число степеней свободы равно нулю.

Например, 1/16-реплика от полного факторного эксперимента 2^7 (табл. 5.12) является насыщенной, так как линейная модель не содержит коэффициентов, которые необходимо определить по результатам восьми экспериментов. При этом не остается степеней свободы для проверки адекватности модели.

Дробные реплики широко применяют при получении линейных моделей. Эффективность применения дробных реплик зависит от удачного выбора системы смешивания линейных эффектов с эффектами взаимодействия. При построении дробных реплик используют следующее правило: новый фактор, введенный в планирование, нужно поместить в столбец матрицы, принадлежащий взаимодействию, которым можно пренебречь.

Свойства матриц полного и дробного факторных экспериментов.

1. Свойство симметричности относительно центра эксперимента – алгебраическая сумма элементов столбца каждого фактора равна нулю, определяется отношением

$$\sum_{f=1}^{N} x_{ij}=0, \tag{5.32}$$

где j – номер опыта; i – номер фактора; N – число опытов в матрице.

2. Свойство нормировки – сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов, определяется отношением

$$\sum_{f=1}^{N} x_{ij}^2=N. \tag{5.33}$$

3. Свойство ортогональности – сумма построчных произведений элементов любых двух столбцов равна нулю, определяется отношением

$$\sum_{f=1}^{N} x_{ij}x_{lj}=0, \tag{5.34}$$

где i, l – номера факторов, причем $i \neq l$.

Ортогональность является одним из наиболее важных свойств матрицы. Ортогональность матрицы позволяет оценить все коэффициенты уравнения регрессии независимо друг от друга, т. е. величина любого коэффициента не зависит от того, какие величины имеют другие коэффициенты. Если тот или иной коэффициент регрессии окажется незначимым, то его можно не учитывать, не пересчитывая остальных.

4. Свойство ротатабельности – точки в матрице планирования подбирают так, что математическая модель, полученная по результатам полного или дробного факторных экспериментов, способна предсказывать параметры оптимизации с одинаковой точностью в любых направлениях на равных расстояниях от центра эксперимента. Это очень важное свойство матрицы, так как, начиная эксперимент, исследователь не знает, в каком направлении предстоит двигаться в поисках оптимума.

Неполные планы экспериментов. Полные многофакторные планы редко удается осуществить из-за практической невозможности провести наблюдения при всех возможных комбинациях уровней факторов. Поэтому для практики особенно важное значение имеют неполные планы экспериментов. При этом возникают задачи опти-

мального выбора комбинации уровней факторов при данном числе экспериментов с целью получения минимальных дисперсий оценок параметров.

К неполным планам, кроме дробных факторных экспериментов, относят:

– планы Плакетта – Бермана (матрицы Адамара) для отсеивания;

– латинские квадраты;

– греко-латинские и гипер-греко-латинские квадраты;

– латинские кубы, прямоугольники, параллелепипеды;

– квадраты Юдена, являющиеся разновидностью латинских прямоугольников;

– сложные планы, построенные на базе латинских планов.

Все перечисленные неполные планы факторных экспериментов основаны, как и дробные факторные эксперименты, на введении новых факторов взамен малокоррелированных эффектов взаимодействия факторов.

Простейшим неполным трехфакторным планом эксперимента является так называемый *план латинского квадрата*. В этом плане все три фактора имеют одно и то же число уровней μ и при каждой комбинации уровней любых двух факторов наблюдение производится, только для одного уровня третьего фактора. При этом число наблюдений равно μ^2 вместо μ^3 в случае полного трехфакторного плана.

Ясно, что для неполных планов не все взаимодействия факторов могут быть оценены из-за недостаточности числа наблюдений. Так, например, в плане латинского квадрата взаимодействия факторов невозможно оценить, так как для каждой комбинации уровней двух факторов имеется лишь одно наблюдение.

Дисперсионный анализ для неполных планов производится совершенно так же, как для полных. Только суммирование при вычислении средних производится не по всем возможным комбинациям уровней факторов, а только по тем, для которых производятся наблюдения. Соответственно изменяются знаменатели и числа слагаемых в выражениях средних.

Принимая для плана латинского квадрата

$$MY_{ijk} = b_0 + b_{1i} + b_{2j} + b_{3k} \ \ (i,j,k = 1,\ldots,\mu),$$

$$\sum_{i=1}^{\mu} b_{1i} = \sum_{j=1}^{\mu} b_{2j} = \sum_{k=1}^{\mu} b_{3k} = 0,$$

получим несмещённые оценки параметров b_0, b_{1i}, b_{2j}, b_{3k} и K_y, выраженные формулами (5.35)–(5.40):

$$\hat{B}_0=\frac{1}{\mu}\sum_{I}Y_{ijk}, \tag{5.35}$$

$$\hat{B}_{1i}=\frac{1}{\mu}\sum_{I_1(i)}Y_{ijk}-\hat{B}_0, \tag{5.36}$$

$$\hat{B}_{2j}=\frac{1}{\mu}\sum_{I_2(j)}Y_{ijk}-\hat{B}_0, \tag{5.37}$$

$$\hat{B}_{3k}=\frac{1}{\mu}\sum_{I_3(k)}Y_{ijk}-\hat{B}_0, \tag{5.38}$$

$$\hat{K}_y=\frac{S}{(\mu-1)(\mu-2)}, \tag{5.39}$$

$$S=\sum_{I}(Y_{ijk}-\hat{B}_0-\hat{B}_{1i}-\hat{B}_{2j}-\hat{B}_{3k})(Y_{ijk}-\hat{B}_0-\hat{B}_{1i}-\hat{B}_{2j}-\hat{B}_{3k})^T, \tag{5.40}$$

где t – множество комбинаций индексов i, j, k, для которых производятся наблюдения; $I_1(i)$ – множество комбинаций индексов j, k, для которых при данном i производятся наблюдения; $I_1(i)$ = = $\{(j, k):(i, j, k) \in I\}$, так же определяются $I_2(j)=\{(i,k):(i,\ j,\ k)\in I\}$ и $I_3(k)=\{(i,\ j):(i,\ j,\ k)\in I\}$.

Вектор B_0 и матрицы $B_p=\left[B_{p1}\cdots_{p\mu}\right]$ $(p=1,\ 2,\ 3)$ не коррелированы, и ковариационные матрицы векторов B_0, B_{1i}, B_{2j} и B_{3k} определяются при $\nu=\mu$. Несмещённые оценки этих матриц получаются заменой матрицы K_y её несмещённой оценкой.

Несмещённые оценки ковариаций средних за счёт каждого из трех факторов

$$K_p=\frac{1}{\mu-1}\sum_{i=1}^{\mu}b_{pi}b_{pi}^T\ \ (p=1,\ 2,\ 3)$$

определяются формулой

$$K_p=\frac{1}{\mu-1}\left[\sum_{i=1}^{\mu}B_{pi}B_{pi}^T-\frac{S}{\mu(\mu-2)}\right]\ (p=1,\ 2,\ 3). \tag{5.41}$$

Постановка задачи на эксперимент – это построение логической модели изучаемого процесса, которая включает цель исследования, выдвижение гипотезы, подлежащей проверке, или ряда конкурирующих гипотез. Затем следует выбор стратегии исследования. Построение модели изучаемого процесса и выбор стратегии исследования проходят неформализованным путём: используется опыт исследователя, его предыдущие знания, в том числе и знания теории эксперимента. На неформализованном уровне принимаются решения, в какой степени выполняется предпосылки, на которых базируется теория, задающая примеры исследования.

Целью планирования МФЭ является выбор числа и распоряжения в факторном пространстве экспериментальных точек так, чтобы при минимуме точек получить информацию, достаточную для определения характеристик объекта. Здесь чётко выделяются следующие две неформализованные ситуации, требующие принятия решения:

– при выборе области проведения эксперимента и интервалов варьирования факторов;

– после первой серии опытов, когда получено уравнение регрессии.

В первой ситуации принятие решения (выбор экспериментальной области факторного пространства) связано с тщательным анализом априорной информации, точностью измерения факторов, характером поверхности отклика и диапазоном изменения контролируемого параметра.

После того как получено уравнение регрессии, решения главным образом зависят от адекватности линейной модели, положения области оптимума, значимости коэффициентов регрессии.

Выбор контролируемых параметров (зависимых переменных) определяется типом испытываемых объектов в каждом конкретном случае. Однако в любом случае в качестве контролируемых параметров необходимо выбирать такие параметры объекта, которые наиболее полно характеризуют его работоспособность. Кроме того, на выбор контролируемых параметров значительное влияние оказывают такие моменты, как возможность непосредственного их измерения, точность измерения, наличие и возможности контрольно-измерительной аппаратуры, стоимость одного измерения и т. д. Перед тем как остановиться на тех или иных параметрах, необходимо убедиться в том, что они удовлетворяют основным условиям, выполнение кото-

рых требуется для обоснованного применения методов дисперсионного и регрессионного анализа.

Такими условиями являются:

– результаты наблюдений контролируемых параметров должны представлять собой независимые, нормально распределенные случайные величины;

– дисперсии $\sigma^2\{Y_u\}$, $u = \overline{1, N}$ должны быть равны друг другу (выборочные оценки $S^2\{Y\}$ однородны).

Условие нормальности, вообще говоря, не является безусловным. Метод наименьших квадратов можно применять для определения коэффициентов регрессии и в том случае, когда не имеет места нормальное распределение для контролируемого параметра.

На практике часто приходится иметь дело со случайной величиной Y, не подчиняющейся нормальному распределению. В этом случае всегда можно подобрать такую функцию преобразования, чтобы перейти от Y к новой случайной величине $g = f(Y)$, закон распределения которой близок к нормальному. Второе условие (однородность дисперсий) также не всегда выполняется в условиях реального эксперимента. Если в этом случае удается найти функциональную зависимость $\sigma^2\{Y\} = \varphi(Y)$, то оказывается возможным предложить такое преобразование случайной величины, которое позволяет получить однородные дисперсии.

Для простых объектов выбор контролируемых параметров сводится к отысканию определяющих параметров, а также, в случае необходимости, косвенных параметров, с помощью которых наиболее адекватно идентифицируются физико-химические процессы, приводящие к отказам. Иначе обстоит дело с выбором контролируемых параметров сложных систем. Параметры, контроль которых может обеспечить информацию о работоспособности сложного объекта, определяют специальными методами, учитывающими индивидуальные характеристики объекта.

Выбор варьируемых факторов внешней среды и определение уровней их варьирования. Численные значения показателей надёжности объектов в значительной степени определяются условиями их применения. Поэтому основным вопросом при организации испытаний на надёжность является выявление условий, в которых должны испытываться объекты. В связи с этим выбор факторов внешней сре-

ды должен основываться на результатах исследования предполагаемых условий эксплуатации.

К настоящему времени в основном получены необходимые данные для характеристик реальной эксплуатации объектов в условиях действия различных факторов внешней среды, поименованных, как правило, в технических условиях на конкретные виды объектов.

Выбор варьируемых факторов не заканчивается исследованием окружающих условий. В процессе исследования предполагаемых условий эксплуатации нужно установить, какие факторы в наибольшей степени могут влиять на выходные характеристики объекта. С этой целью во многих случаях целесообразно начинать с постановки отсеивающих экспериментов, по результатам которых можно выделить доминирующие эффекты факторов среди большого числа потенциально возможных. Кроме того, определяющее влияние на выбор факторов оказывают технические возможности испытательных установок. Создание установок, позволяющих имитировать все условия эксплуатации, экономически нецелесообразно.

Располагая данными об условиях работы объекта, можно определить основные уровни варьирования факторов. Делается это следующим образом. Составляется график функции, характеризующий изменение действующих факторов во время эксплуатации. Весь период эксплуатации делится на n интервалов длительностью Δt каждый. Значения t принимаются равными продолжительности выполнения задачи, для решения которой предназначен объект. Далее составляется вариационный ряд, по данным которого определяются среднее, эффективное и максимальное значения действующего фактора в последовательности:

а) определяют значения действующего фактора в интервалах длительностью Δt;

б) определяют частоты появления интервалов длительностью Δt;

в) рассчитывают частости появления интервалов длительностью Δt;

г) рассчитывают накопленную частость появления интервалов.

В качестве значений основных уровней факторов, при воздействии которых должны проводиться испытания объектов, следует принять такие значения, которым соответствует наибольшая плотность распределения, т. е. значения, близкие к моде распределения. По данным вариационного ряда распределения факторов мода вычисляется из уравнения

$$M_0 = M_1 + \frac{\Delta X(W_1 + W_2)}{W_1 - 2W_2 + W_3}, \tag{5.42}$$

где M_1 – начало модального интервала значений фактора; W_1 – частость модального интервала; W_2, W_3 – частости соседних интервалов; ΔX – ширина интервалов значений фактора.

Среднее значение случайной величины, характеризующей изменение фактора по времени, можно определить путём усреднения данных по неслучайному параметру t (время эксплуатации объекта) при использовании единственной записи процесса за достаточно большой интервал времени эксплуатации.

По оси времени откладывается n равных отрезков, и в конце каждого из них определяются значения факторов X_i, $i = 1, n$, по имеющейся реализации. Среднее арифметическое $\overline{X}$ этих значений дает статистическую оценку постоянного для данного процесса математического ожидания.

На практике как воздействующие факторы, так и прочность материалов сочетаются случайным образом. При этом как минимальные, так и максимальные значения факторов появляются с определенной вероятностью, т. е. можно рассматривать распределение вероятностей этих величин. Задаваясь определенной достоверностью, т. е. отбрасывая интервалы значений факторов, вероятность попадания в которые достаточно мала, можно получить расчётные экспериментальные значения факторов. Решение этой задачи достигается с помощью оценки распределения крайних членов выборки.

Через $F(X)$ обозначим вероятность того, что некоторый случайный фактор имеет значение меньше X; $F'(X) = f(X)$ – плотность вероятности. Вероятность того, что n независимых наблюдений дадут значения меньше, чем X, равна $F''(X)$. Тогда вероятность того, что данное наибольшее значение будет меньше, чем X_n, равна $\Phi(X_n) = F^n(X_n)$, а её производная $\varphi(X_n) = nF^{n-1}(X_n) f(X_n)$ будет распределением наибольших значений n независимых наблюдений.

Распределения наибольшего значения при большом объёме выборки имеют вид

$$\left.\begin{aligned} \Phi(X) &= e^{-e^{-z}} \\ \Phi'(X) &= a_n e^{-Ze^{-Z}} \end{aligned}\right\}, \tag{5.43}$$

где $Z=a_n(X-\mu_n)$, а $\frac{1}{a_n}=\frac{d\mu_n}{d\ln n}$ – наибольшее вероятное значение фактора; μ_n – мера повышения наибольшего вероятного значения в зависимости от логарифма объёма выборки или мера дисперсии распределения.

Экспериментальные значения фактора определяются в следующей последовательности.

Строится график зависимости значений X исследуемых максимумов от нормированных отклонений Z, представляющих собой аргументы функции exp[–exp(–Z)]. Для X и Z выбираются линейные (равномерные) шкалы. Значение Z откладывается по горизонтальным осям. Параллельно основной шкале Z дается дополнительная, функциональная шкала, на которой откладывается накопленная частота. Обычно эта шкала неравномерная (логарифмическая). По вертикальной оси графика откладываются наблюдаемые значения X максимумов. Совокупность точек на графике аппроксимируется соответствующей линией, которая и позволяет прогнозировать значения максимумов с назначенной вероятностью.

Таким образом, определение уровней воздействующих факторов должно производиться в следующем порядке:

а) исследуются предполагаемые условия применения объектов;

б) устанавливаются факторы, оказывающие наибольшее влияние на выходную характеристику объекта;

в) составляется вариационный ряд для каждого фактора. Вычисляются накопленные частоты для каждого интервала ряда;

г) вычисляются мода M_n и среднее квадратичное отклонение;

д) вычисляются мера дисперсии a_n и наибольшее вероятное значение фактора μ_n по формулам:

$$\frac{1}{a_n}=\frac{\sigma_X}{\sigma_n}, \tag{5.44}$$

$$\mu_n=M_n-\frac{Z_n}{a_n}, \tag{5.45}$$

где значения σ_n и Z_n определяются с помощью специальных таблиц в зависимости от объёма выборки n.

Последовательность действий при выборе основного уровня фактора схематично показана на рисунке 5.2.



Рис. 5.2 – Принятие решения при выборе основного уровня фактора

Определение количества уровней варьируемых факторов и интервала их варьирования. Для отыскания поверхности отклика рекомендуется ставить эксперименты типа 2^k, а поверхность отклика задавать уравнением первой или второй степени. Затем на основании результатов эксперимента определять, дают ли заданные уравнения хорошее согласие с действительностью.

Однако такой путь слишком трудоемок и недостаточно эффективен. Действительно, если окажется, что уравнения дают неудовлетворительное согласие, то эксперимент надо повторять с новым набором исходных данных до тех пор, пока не будет получено хорошее согласие.

Но даже и в случае быстрого получения достаточного согласия уравнений с результатами наблюдений может оказаться, что они справедливы только для локальной поверхности исследования, и при небольшом удалении от нее поверхность отклика будет описываться другим уравнением, следовательно, надо снова ставить эксперименты для нахождения этого уравнения. Поэтому целесообразнее уже на первой стадии эксперимента оценить, какой эффект – линейный, квадратичный или кубический – оказывает каждый фактор, а также оценить их взаимодействие и степень влияния на протекание процес-

сов в объекте. Зная это, можно с большей определенностью решать вопрос о характере уравнения поверхности отклика. Для этого необходимо определить минимальное количество уровней факторов, испытания на которых позволят оценить указанные эффекты. Для определения линейного и квадратичного эффектов надо иметь не менее трех уровней факторов X_i. Если фактор меняется на четырёх уровнях, то можно выделить линейный, квадратичный и кубический эффекты, подбирая коэффициенты для суммарных откликов с использованием таблиц ортогональных полиномов, которые дают соответствующие коэффициенты в зависимости от количества уровней фактора.

О существовании взаимодействия между факторами говорят тогда, когда изменение одного фактора сопровождается различными изменениями результатов эксперимента при разных уровнях другого фактора. В принципе, для определения взаимодействия между факторами достаточно провести факторный эксперимент типа 2^k, однако установить по результатам такого эксперимента степень взаимодействия между факторами не представляется возможным. Поэтому и в этом случае необходимо иметь для каждого фактора более двух уровней. Тогда появляется возможность оценить степень взаимодействия кубического эффекта одного фактора с кубическим эффектом всех остальных факторов.

Однако на практике часто бывает трудно дать интерпретацию некоторым из высоких полиномиальных взаимодействий, поэтому ограничиваются определением только взаимодействий линейных эффектов, линейных с квадратичными и квадратичных с линейными, а оставшиеся рассматриваются вместе как остаточное взаимодействие. Для определения указанных степеней взаимодействий достаточно иметь в матрице планирования по четыре уровня каждого фактора. Дальнейшее увеличение количества уровней ведет к неоправданному усложнению эксперимента, увеличивает его продолжительность и усложняет вычислительные работы. Поэтому будем считать, что для проведения испытаний объектов на воздействие факторов внешней среды для каждого фактора достаточно четырёх уровней.

Назначая для каждого фактора четыре уровня, необходимо определить интервалы между ними. Выбор интервала варьирования, как правило, носит случайный характер. Однако выбор можно осуществить, исходя из оценки общей погрешности эксперимента. При

этом должно учитываться следующее. Увеличение интервала варьирования ΔX ведет к уменьшению относительной погрешности измерения X; но, с другой стороны, это вызывает неизбежное увеличение погрешности отнесения, вследствие отклонения среднего значения измеряемого параметра в интервале варьирования $X_1 - X_2$ от его истинного значения, отнесенного к среднему значению фактора: $\overline{X} = (X_1 + X_2)/2$.

Следовательно, при выборе значения ΔX, соответствующего минимальной погрешности эксперимента, необходимо учитывать два фактора – погрешность в измерении интервала варьирования и погрешность отнесения. Это позволяет сделать вывод, что остальные факторы, входящие в общую погрешность эксперимента, не зависят от значения ΔX и для каждого данного значения исследуемого фактора остаются постоянными.

Оптимальный интервал варьирования ΔX для заданных условий вычисляется по формуле

$$\Delta X_{onm} = \sqrt{\frac{12 const Y(\overline{X})}{\left(\frac{d^2 Y}{dX^2}\right) X}}, \qquad (5.46)$$

где $Y(\overline{X})$ – значение определяющего параметра при среднем значении фактора; *const* – определяется типом контрольно-измерительной аппаратуры.

Для оценки ΔX_{onm} необходимо, хотя бы ориентировочно, знать $Y(\overline{X})$, что невозможно в начале эксперимента. Поэтому выбор ΔX_{onm} возможен лишь после первой стадии эксперимента, когда будет получена приближенная оценка влияния фактора на зависимую переменную Y.

Определение объёма выборки. В многофакторных экспериментах размер выборки зависит от количества экспериментов и требуемой точности определения значений выходной характеристики объекта. Количество экспериментов определяется числом исследуемых факторов и порядком уравнения регрессии, которым описывается зависимость выходной характеристики от воздействующих факторов внешней среды. В общем случае результаты эксперимента можно представить полиномом степени d, содержащим C_{k+d}^{d} коэффициен-

тов. Для определения этих коэффициентов количество экспериментов должно быть выбрано так, чтобы удовлетворялось соотношение

$$N \geq C_{k+d}^{d}. \qquad (5.47)$$

В таблице 5.13 представлено минимальное потребное количество экспериментов в зависимости от числа исследуемых факторов k степени d полинома.

Таблица 5.13 – Минимальное потребное количество экспериментов

k	C_{k+d}^{d}		
	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$
1	1	3	4
2	3	6	10
3	4	10	20
4	5	15	35
5	6	21	56
6	7	28	84

При увеличении количества исследуемых факторов и числа уровней варьирования потребное количество экспериментов существенно возрастает. Однако в некоторых случаях для нахождения уравнения приближенной регрессии бывает достаточно варьировать факторы на двух уровнях. В этом случае полное исследование влияний, являющихся результатами изменения k факторов, потребует проведения $N = 2^k$ экспериментов.

В таблице 5.14 показано количество экспериментов, необходимое для выявления основных влияний и взаимодействий низкого порядка для нескольких 2^k факторных экспериментов.

Таблица 5.14 – Количество экспериментов для выявления основных влияний и взаимодействий

Влияние	Число экспериментов при:						
	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
Основное (линейное)	2	3	4	5	6	7	8
Взаимодействие двух факторов	1	3	6	10	I5	1	28
Взаимодействие трех факторов	–	1	4	10	20	3	56
Взаимодействие четырёх факторов	–	–	1	5	15	35	70
Общее число экспериментов	4	8	16	32	64	128	256

Количество испытываемых объектов для каждого эксперимента зависит от требуемой точности результатов эксперимента и определяется по формуле

$$n = \frac{t_\alpha^2 \sigma^2}{\Delta^2}, \tag{5.48}$$

где n – количество объектов для одного эксперимента; t_α – коэффициент, характеризующий вероятность того, что расхождение не будет больше Δ (при $t_\alpha = 2$ вероятность $\alpha = 0{,}95$; при $t_\alpha = 3$ вероятность $\alpha = 0{,}997$); σ – среднее квадратичное отклонение параметра в генеральной совокупности; Δ – максимальное расхождение между выборочными и генеральными средними арифметическими, соответствующее заданной вероятности α.

Выражение (5.48) справедливо, если имеет место нормальный закон распределения.

Таким образом, объём выборки, необходимый для проведения экспериментов, будет определяться выражением

$$N_1 \geq \frac{t_\alpha^2 \sigma^2}{\Delta^2} C_{k+d}^d , \tag{5.49}$$

Для оценки воспроизводимости эксперимента требуется проведение m параллельных опытов. Как показывает практика, для одного режима испытаний оказывается достаточно трёх-четырёх параллельных опытов. Тогда объём выборки будет определяться выражением

$$N_2 \geq \frac{t_\alpha^2 \sigma^2}{\Delta^2} (C_{k+d}^d + m). \tag{5.50}$$

В частности, если на каждый режим (опыт) устанавливается каждый раз новая партия объектов, то общий расход объектов при испытаниях с использованием планов типа 2^k равен

$$N_3 \geq \frac{t_\alpha^2 \sigma^2}{\Delta^2} (2^k + m). \tag{5.51}$$

Планы наблюдений. Планы наблюдений для определения показателей надёжности объектов могут быть представлены в виде

[N,U,N]; [N,U,L]; [N,U,r]; [N,R,L]; [N,R,r],

где N – количество изделий, поставленных под наблюдение; U – обозначение планов, в которых отказавшие изделия не заменяются новыми; L –установленная наработка для наблюдения; R – обозначение

планов, в которых отказавшие объекты заменяются новыми или отремонтированными; r – число отказов или предельных состоянии изделий, до возникновения которых ведутся наблюдения.

План наблюдений [N,U,N], или полный план, означает, что под наблюдение взята контрольная партия из N объектов или их сборочных единиц, и испытания проводятся до отказа всех объектов, при этом отказавшие изделия не заменяются новыми, т. е. при полном плане определяется наработка до отказа неремонтируемых изделий. Если объекты ремонтируемые, то при таком плане выявляются наработки только до первого отказа, затем они исключаются из опыта. Сведения о дальнейших наработках до отказов этих объектов могут быть учтены как дополнительная информация о работе объектов (свыше N). Модель эксплуатации n объектов при плане [N,U,N] приведена на рисунке 5.3. Количество контролируемых объектов определяется согласно требованиям к объёму выборки, изложенным выше.

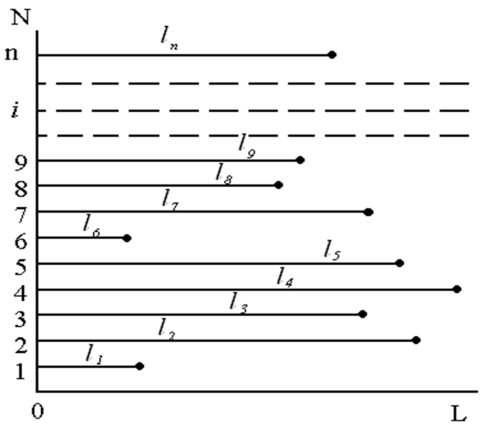


Рис. 5.3 – Модель плана наблюдений [N,U,N]

В связи с применением для многих машин системы планово-предупредительных ремонтов наиболее широкое распространение получил план с фиксированной наработкой L, т. е. [N,U,L]. В общем случае L – установленный пробег до конца испытаний, а практически это пробег L_p, после которого проводится плановый ремонт объекта.

При плане [N,U,L], модель которого изображена на рисунке 5.4, наблюдается состояние всех N объектов в течение регламентированного

пробега L_p. При первом же отказе *i-го* объекта с наработкой $L < L_p$ дальнейшее наблюдение за этим объектом прекращается. В данные о результатах наблюдений не включаются сведения об объектах, которые не отказали за пробег L_p или были направлены в ремонт с меньшим, чем L_p, пробегом. Так, по рисунку 5.4 можно принять к учёту данные о пробегах до отказа l_1, l_5, l_6, l_8, l_{10}. Объекты 7 и 9 из наблюдений исключаются, так как они были направлены в ремонт с пробегом меньше L_p. Данные о пробегах объектов 2, 3 и 4 могут быть использованы как дополнительные сведения для определения параметра усеченной выборки.

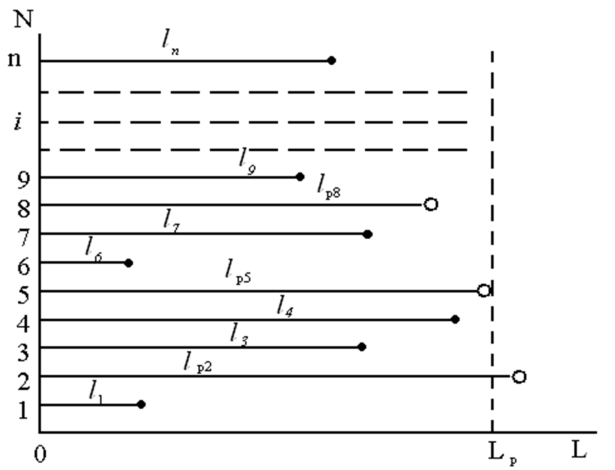


Рис. 5.4 – Модель плана наблюдений [N, U, L]

При плане [N, U, L] часть информации теряется, снижая точность определения показателей надёжности. Более достоверные данные можно получить, если известен вид закона распределения наработки до отказа. Достоинством этого плана является меньший срок наблюдений, поскольку отпадает необходимость ожидать достижения отказов всех N объектов. План широко используется в практике определения показателей надёжности, особенно если число объектов N велико, а вероятность отказа мала. План [N, U, L] может быть использован как для ремонтируемых объектов, так и для неремонтируемых. Отличие состоит в том, что отремонтированный после первого отказа объект в дальнейшем из наблюдений исключается.

В плане [N, U, r] под наблюдением находятся N объектов, отказавшие изделия новыми не заменяются, наблюдения продолжаются до накопления данных об отказах или предельных состояниях. Схема модели представлена на рисунке 5.5, где наработки расположены в порядке возрастания. Как только у r-го объекта произойдет отказ, наблюдение прекращается, хотя (N–r) объектов работают без отказов. После первого отказа наработка каждого из r отказавших объектов не учитывается, даже если они после ремонта вновь используются в эксплуатации.

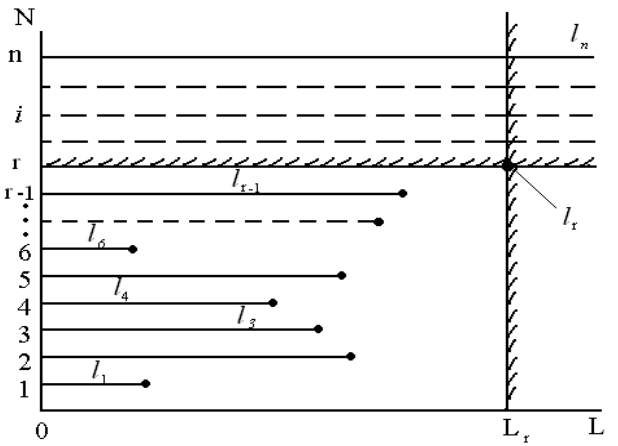


Рис. 5.5 – Модель плана наблюдений [N, U, r]

В плане [N, R, r] взятые под наблюдения N объектов после отказа заменяются новыми (или ремонтируются за короткое время), а наблюдения ведутся до получения r отказов. Если время ремонта велико, то используется план U.

План наблюдений [N, R, L] важен для определения показателей надёжности ремонтируемых изделий. В этом плане (рис. 5.6) отказавшие изделия заменяются новыми или отремонтированными за короткое время, не влияющими на результаты определения оценок показателей надёжности. В противном случае следует отказаться от плана R и использовать план U.

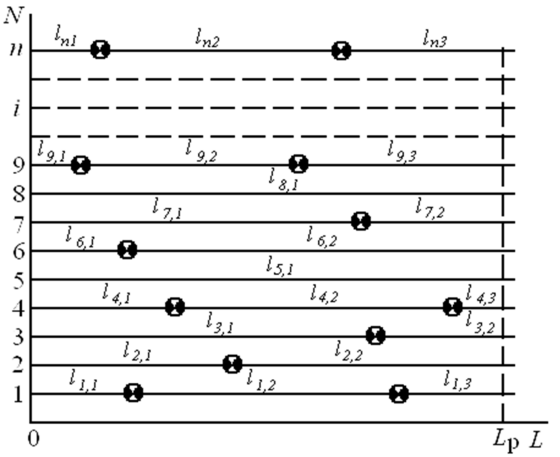


Рис. 5.6 – Модель плана наблюдений [N, R, L]

Из рассмотрения модели плана наблюдений [N, R, L] (рис. 5.6) следует, что статистическая информация о наработках при этом плане может быть трех видов: наработка *i*-го объекта до первого отказа (например, $l_{1.1}$, $l_{2.1}$, $l_{N.1}$); наработка *i*-го объекта до отказа после ремонта или замены (например, $l_{1.2}$, $l_{N.2}$); наработка до отказа после начала работы или после ремонта неизвестна, но она или не меньше L_p (наработка $l_{3.1}$), или меньше L_p (наработки $l_{1.3}$, $l_{2.2}$, $l_{N.3}$).

Для расчёта параметров закона распределения до отказа могут быть использованы в равной мере наработки первых двух видов, если изделия заменяются новыми или все рабочие параметры после ремонта восстанавливаются полностью. Информация о наработках третьего вида также может быть частично использована. Пусть, например, отдельные наработки третьего вида $l_{1.3}$, $l_{2.2}$, $l_{N.3}$ окажутся больше, чем наибольшая из наработок вида 1 и 2. Они могут быть учтены вместе с наработкой $l_{3.1} > L_p$ для определения параметров по усеченной выборке как наработки, о которых можно сказать, что они больше максимально возможной. Такой план дает возможность определять ряд показателей безотказности ремонтируемых объектов.

Изучение показателей ремонтопригодности возможно на основе любого плана наблюдений с использованием данных о затратах времени и ресурсов для восстановления работоспособности отка-

завших объектов. Выбор того или иного плана наблюдения зависит от многих факторов: вида объектов, номенклатуры показателей, подлежащих оценке по результатам наблюдений и др.

5.3. Проведение эксперимента и обработка результатов

После выбора плана эксперимента, основных уровней и интервалов варьирования факторов переходят к эксперименту. Каждая строка матрицы – это условия эксперимента. Для исключения систематических ошибок рекомендуется эксперименты, предусмотренные матрицей, проводить в случайной последовательности. Порядок проведения следует выбирать по таблице случайных чисел, фрагмент которой приведен в таблице 5.15. Например, если требуется провести восемь экспериментов, то из случайного места таблицы последовательно выписывают числа, лежащие в интервале от 1 до 8, при этом не учитываются уже выписанные и числа больше восьми. Так, например, начиная с числа 87 (1-я строка табл. 5.15) получаем следующую последовательность реализации экспериментов:

Номер опыта в матрице 1 2 3 4 5 6 7 8.

Порядок реализации экспериментов 7 2 8 3 1 4 5 6.

Таблица 5.15 – Фрагмент таблицы случайных чисел

Фрагмент таблицы случайных чисел																
8	6	8	2	6	5	0	6	5	0	8	4	1	9	5	4	9	3
7	3	8	3	2	1	7	9	9	2	9	9	4	8	3	1	2	6
0	7	8	3	8	3	4	3	2	2	1	0	8	3	5	5	3	2
7	6	5	7	4	7	7	2	5	1	5	8	2	4	7	7	5	2
0	3	4	8	3	3	2	3	3	8	7	2	0	6	4	6	8	2
3	3	8	4	7	7	9	8	7	9	6	5	9	9	4	1	8	3
1	0	5	4	6	0	9	5	9	2	3	8	3	3	6	4	5	4
3	1	9	7	4	4	9	9	6	0	0	7	1	3	9	5	8	8
0	8	4	9	4	0	6	7	4	6	4	1	6	1	8	8	2	8
0	3	8	4	4	8	7	9	1	1	1	5	0	1	8	3	4	2
2	0	7	6	8	4	5	8	2	1	1	2	4	0	0	6	4	3
4	7	8	1	9	2	8	8	2	6	3	4	0	9	0	5	6	8
6	1	9	6	4	1	5	8	1	4	6	2	8	7	0	2	8	7
1	2	0	2	1	1	9	5	8	2	1	9	8	6	4	1	0	8
2	8	0	9	8	7	6	8	0	5	0	7	7	2	3	9	9	0
7	4	5	9	5	5	7	0	5	7	5	1	0	1	1	9	9	6
9	5	9	2	1	6	6	3	9	5	3	3						

Для компенсации влияния случайных погрешностей каждый эксперимент рекомендуется повторить n раз. Эксперименты, повторенные несколько раз при одних и тех же значениях факторов, называют параллельными. Под дублированием понимают постановку параллельных экспериментов. Обычно число n параллельных экспериментов принимают равным 2–3, реже 4–5. При проведении исследований приходится иметь дело с тремя вариантами дублирования экспериментов:

– с равномерным дублированием экспериментов;

– с неравномерным дублированием экспериментов;

– без дублирования экспериментов.

При равномерном дублировании все строки матрицы планирования имеют одинаковые числа параллельных экспериментов. В случае неравномерного дублирования числа параллельных экспериментов неодинаковы. При отсутствии дублирования параллельные эксперименты не проводятся. Наиболее предпочтительным из трех вариантов дублирования является первый. При этом варианте эксперимент отличается повышенной точностью, а математическая обработка экспериментальных данных – простотой. Характер дублирования влияет на содержание математической обработки результатов наблюдений. Рассмотрим методику обработки результатов эксперимента для каждого из трех вариантов дублирования.

Обработка результатов эксперимента при равномерном дублировании. Для каждой строки матрицы планирования по результатам n параллельных экспериментов находят $\overline{y}_j$ среднее арифметическое значение параметра оптимизации по формуле

$$\overline{y}_j = \frac{1}{n}\sum_{u=1}^{n} y_{ju}, \qquad (5.52)$$

где u – номер параллельного эксперимента; y_{ju} – значение параметра оптимизации в u-м параллельном эксперименте j-й строки матрицы.

С целью оценки отклонений параметра оптимизации от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования вычисляют дисперсию s_j^2 эксперимента по данным n параллельных экспериментов. Статистической дисперсией называют среднее значение квадрата отклонений случайной величины от её среднего значения и определяют по формуле

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{u=1}^{n}(y_{ju} - \bar{y}_j)^2. \quad (5.53)$$

Ошибка s_j эксперимента определяется как корень квадратный из дисперсии – среднее квадратическое отклонение и определяется по формуле

$$s_j = +\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{u=1}^{n}(y_{ju} - \bar{y}_j)^2}. \quad (5.54)$$

В этом случае ошибка при большом рассеянии будет значительной. Рассеяние результатов эксперимента определяется влиянием неуправляемых факторов, погрешностями измерений и другими причинами. Большое рассеяние изучаемой величины может произойти из-за наличия в эксперименте сомнительных результатов. Для проверки сомнительных, т. е. резко выделяющихся, результатов используют специальные критерии. Чтобы оценить принадлежность резко выделяющихся результатов $y_{j\,\max}$ или $y_{j\,\min}$ к данной нормальной совокупности и принять решение об исключении или оставлении их в составе выборки, находят отношение (5.55) или (5.56):

$$U_{\max} = \frac{y_{j\max} - \bar{y}_j}{s_j}, \quad (5.55)$$

$$U_{\min} = \frac{\bar{y}_j - y_{j\min}}{s_j}, \quad (5.56)$$

где $y_{j\,\max}$ – наибольшее значение параметра оптимизации среди его значений, полученных в n параллельных экспериментах j-й строки матрицы планирования; $y_{j\,\min}$ – наименьшее значение параметра оптимизации среди его значений, полученных в n параллельных экспериментах j-й строки матрицы планирования.

Результат сравнивают с величиной β, взятой из ГОСТ 11.002-73 (таблица 1, ГОСТ) для числа n параллельных экспериментов и принятого уровня значимости α. Число n параллельных экспериментов и объём выборки n в рассматриваемом случае понятия равноценные. Если $U_{\max} \geq \beta$, то сомнительный результат может быть исключен, в противном случае его считают нормальным и не исключают.

Аналогично производится оценка результата $y_{j\,\min}$: если $U_{\min} \geq \beta$, то сомнительный результат признают анормальным; при $U_{\min} < \beta$ подозреваемый в анормальности результат считают нормальным. Чтобы

числа параллельных экспериментов были одинаковы во всех строках матрицы, необходимо повторить те, результаты которых были признаны анормальными. В математической статистике для проверки гипотез пользуются критериями согласия. Для того чтобы принять или забраковать гипотезу при помощи этих критериев, устанавливают уровни их значимости. Уровень значимости представляет собой достаточно малое значение вероятности, отвечающее событиям, которые в данной обстановке исследования можно считать практически невозможными.

Обычно принимают 5%-, 2%- или 1%-ный уровень значимости. Для технических объектов обычно принимают 5%-ный уровень. Уровень значимости α называют также уровнем риска или доверительным уровнем вероятности, который соответственно может быть принят равным 0,05, 0,02, 0,01 в зависимости от класса надёжности объекта. Так, например, при уровне значимости (риска) $\alpha = 0{,}05$ вероятность P верного ответа при проверке нашей гипотезы $P = 1 - \alpha = 1 - 0{,}05 = 0{,}95$, или 95%. Это значит, что в среднем только в 5% случаев возможна ошибка при проверке гипотезы. После вычисления дисперсий проверяют гипотезу их однородности. Проверка однородности двух дисперсий производится с помощью *F-критерия* Фишера, который представляет собой отношение большей дисперсии к меньшей:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}, \tag{5.57}$$

где $s_1^2 \succ s_2^2$.

Если наблюдаемое значение $F_р$-критерия меньше табличного $F_т$ (табл. 5.16) для соответствующих чисел степеней свободы и принятого уровня значимости, то дисперсии однородны. Однородность ряда дисперсий проверяют по критерию Кохрена или по критерию Бартлетта. При равномерном дублировании экспериментов однородность ряда дисперсий проверяют с помощью *G*-критерия Кохрена, представляющего собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G_p = \frac{s_{\max}^2}{s_1^2 + s_2^2 + \ldots + s_N^2} = s_{\max}^2 \Big/ \sum_{j=1}^{N} s_j^2 \ . \tag{5.58}$$

Таблица 5.16 – Значения F-критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости

Число степеней свободы для меньшей дисперсии	Значения критерия при числе степеней свободы для большей дисперсии								
	1	2	3	4	5	6	12	24	≈
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	224,9	249,0	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,5	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0
17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,9
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8
24	4,3	3,4	3,0	2,8	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
26	4,2	3,4	3,0	2,7	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
28	4,2	3,3	3,0	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,7
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3
∞	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,0

Дисперсии однородны, если расчётное значение $G_р$-критерия не превышает табличного значения $G_т$-критерия. В таблице 5.17 N показывает число сравниваемых дисперсий, а n – число параллельных опытов. Если $G_р > G_т$, то дисперсии неоднородны, а это указывает на

то, что исследуемая величина y не подчиняется нормальному закону. В этом случае нужно попытаться заменить y случайной величиной $q = f(y)$, достаточно близко следующей нормальному закону. Если дисперсии s_j^2 экспериментов однородны, то дисперсию s_y^2 воспроизводимости вычисляют по зависимости

$$s_y^2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} s_j^2, \tag{5.59}$$

где N – число экспериментов или число строк матрицы планирования.

Таблица 5.17 – Значения G-критерия при 5%-ном уровне значимости

N	n–1								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598	0,5365	0,5175	0,5017
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184	0,3980	0,3817	0,3682
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362	0,3185	0,3043	0,2926
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823	0,2666	0,2541	0,2439
12	0,5410	0,3924	0,3624	0,2880	0,2624	0,2439	0,2299	0,2187	0,2098
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419	0,2195	0,2034	0,1911	0,1815	0,1736
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602	0,1501	0,1422	0,1357

По результатам эксперимента вычисляют коэффициенты модели. Свободный член b_0 определяют по формуле

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \overline{y}_j. \tag{5.60}$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, вычисляют по зависимости

$$b_i = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_{ij}\overline{y}_j. \tag{5.61}$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия, определяют по формуле

$$b_{il} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_{ij}x_{lj}\overline{y}_j, \tag{5.62}$$

где i, l – номера факторов; x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения факторов i и l в j-м эксперименте.

Формулы (5.60), (5.61), (5.62) получены в результате использования метода наименьших квадратов.

Коэффициенты b_0, b_i, b_{ij} – оценки теоретических коэффициентов β_0, β_i, β_{il} регрессии. Оценки, найденные с помощью метода наименьших квадратов, являются наилучшими в том смысле, что они распределены нормально со средними значениями, равными теоретическим коэффициентам, и с наименьшими возможными дисперсиями. Вычислив коэффициенты модели, проверяют их значимость. Проверку значимости коэффициентов можно производить двумя способами: сравнением абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом или с помощью *t*-критерия Стьюдента.

При проверке значимости коэффициентов первым способом для определения доверительного интервала вычисляют дисперсии коэффициентов регрессии. Дисперсию $s^2\{b_i\}$ i-го коэффициента определяют по зависимости

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{nN} s_y^2. \tag{5.63}$$

Доверительный интервал Δb_i находят по формуле

$$\Delta b_i = \pm t_\tau s\{b_i\}, \tag{5.64}$$

где t_τ – табличное значение критерия при принятом уровне значимости и числе степеней свободы f, с которым определялась дисперсия s_y^2; при равномерном дублировании экспериментов число степеней свободы находится по зависимости $f = (n - 1) N$, где N – число экспериментов в матрице планирования, а n – число параллельных экспериментов; $s\{b_i\}$ – ошибка в определении i-го коэффициента регрессии, вычисляемая по формуле $s\{b_i\} = +\sqrt{s^2\{b_i\}}$.

Значения *t*-критерия приведены в таблице 5.18.

Таблица 5.18 – Значения *t*-критерия при 5%-ном уровне значимости

Число степеней свободы	1	2	3	4	5	6	7	8
Значения *t*	12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,30
Число степеней свободы	9	10	11	12	13	14	15	16
Значения *t*	2,26	2,23	2,20	2,18	2,16	2,14	2,13	2,12
Число степеней свободы	17	18	19	20	21	22	23	24
Значения *t*	2,11	2,10	2,09	2,09	2,08	2,07	2,07	2,06
Число степеней свободы	25	26	27	28	29	30	40	60
Значения *t*	2,06	2,06	2,05	2,05	2,05	2,04	2,02	2,00

Коэффициент является значимым, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. При проверке значимости коэффициентов вторым способом вычисляют t_p-критерий по зависимости $t_p = \dfrac{|b_i|}{s\{b_i\}}$ и сравнивают его с табличным t_m. Коэффициент значим, если $t_p > t_m$ для принятого уровня значимости и числа степеней свободы, с которым определялась дисперсия s_y^2. Критерий Стьюдента t_p вычисляют для каждого коэффициента регрессии. Статистически незначимые коэффициенты могут быть исключены из уравнения. После расчёта коэффициентов модели и проверки их значимости определяют дисперсию $s_{\text{ад}}^2$ адекватности. Остаточная дисперсия, или дисперсия адекватности, характеризует рассеяние эмпирических значений y относительно расчётных $\hat{y}$, определенных по найденному уравнению регрессии. Дисперсию адекватности определяют по формуле

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{n\sum_{j=1}^{N}(\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{f} = \frac{n\sum_{j=1}^{N}(\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N-(k+1)}, \qquad (5.65)$$

где $\bar{y}_j$ – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в j-м эксперименте; $\hat{y}_j$ – значение параметра оптимизации, вычисленное по модели для условий j-го опыта; f – число степеней свободы, равное $N - (k + 1)$; k – число факторов.

Последним этапом обработки результатов эксперимента является проверка гипотезы адекватности найденной модели. Проверку этой гипотезы производят по F-критерию Фишера:

$$F_p = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_y^2}. \qquad (5.66)$$

Если значение $F_P < F_m$ для принятого уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы, то модель считают адекватной. При $F_P > F_m$ гипотеза адекватности отвергается. Таким образом, обработка результатов эксперимента при равномерном дублировании экспериментов может быть представлена последовательностью:

а) для каждой строки матрицы планирования по формуле (5.52) вычисляют среднее арифметическое значение $\bar{y}_j$ параметра оптимизации;

б) определяют дисперсию s_j^2 каждого опыта матрицы планирования;

в) используя критерий Кохрена (формула (5.58)), проверяют гипотезу однородности дисперсий s_j^2 опытов;

г) если дисперсии опытов однородны, то по формуле (5.59) вычисляют дисперсию s_y^2 воспроизводимости эксперимента;

д) по формулам (5.60), (5.61), (5.62) определяют коэффициенты уравнения регрессии;

е) по зависимости (5.63) находят дисперсии $s^2\{b_i\}$ коэффициентов регрессии;

ж) по формуле (5.64) устанавливают величину доверительного интервала Δb_i;

з) проверяют статистическую значимость коэффициентов регрессии;

и) по зависимости (5.65) определяют дисперсию $s_{\text{ад}}^2$ адекватности;

к) с помощью F-критерия Фишера проверяют гипотезу адекватности модели.

Необходимо отметить, что использование критериев Кохрена, Стьюдента и Фишера предполагает принадлежность результатов эксперимента к нормальному распределению или приведение результатов к нормальному распределению с помощью промежуточных преобразований.

Обработка результатов эксперимента при неравномерном дублировании. Результаты отдельных экспериментов иногда получаются ошибочными, и их приходится исключать. Вследствие этого числа параллельных экспериментов оказываются неодинаковыми. Возможны и другие ситуации, когда по тем или иным причинам не удается провести одинаковое число параллельных экспериментов в каждом из основных. При неодинаковых числах параллельных экспериментов нарушается ортогональность матрицы планирования и, как следствие, изменяются формулы для определения коэффициентов регрессии и их ошибок. Расчёт коэффициентов регрессии и их ошибок при неодинаковых числах параллельных опытов усложняется.

Обработка результатов эксперимента при неравномерном дублировании производится по следующей схеме:

а) для каждой строки матрицы планирования находят $\bar{y}_j$ – среднее арифметическое значение параметра оптимизации по форму-

ле (5.52) $\bar{y}_f = \frac{1}{n_j}\sum_{u=1}^{nj} y_{ju}$, где n_j – число параллельных экспериментов в *j*-й строке матрицы;

б) для каждой строки матрицы вычисляют дисперсию s_j^2 эксперимента:

$$s_j^2 = \frac{1}{n_j - 1}\sum_{u=1}^{n_j}(y_{ju} - \bar{y}_f)^2.$$

в) проверяют с помощью критерия Бартлетта гипотезу однородности дисперсий. Для этого рассчитывают дисперсию s_y^2 воспроизводимости эксперимента по формуле

$$s_y^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N} fj}\left(\sum_{j=1}^{N} s_j^2 fj\right), \qquad (5.67)$$

где f_j – число степеней свободы, с которым определялась дисперсия s_j^2 *i*-го эксперимента.

После этого определяют величину Q по формуле

$$Q = \frac{1}{c}\left\{f \lg s_y^2 - \sum_{j=1}^{N} fj \lg s_j^2\right\}, \qquad (5.68)$$

в которой c определяется по формуле

$$c = 0,4343\left[1 + \frac{1}{3(N-1)}\left(\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{fj} - \frac{1}{f}\right)\right]; \; f = \sum_{j=1}^{N} fj. \qquad (5.69)$$

Бартлеттом показано, что величина Q приближенно подчиняется χ^2-распределению с $(N-1)$ степенями свободы, где N – число сравниваемых дисперсий.

Если Q меньше $\chi_т^2$ (табл. 5.19) для данного числа $(N-1)$ степеней свободы и принятого уравнения значимости, то дисперсии однородны, и наоборот. Критерий Бартлетта основан на нормальном распределении.

Таблица 5.19 – Значения χ^2 при 5%-ном уровне значимости

Число степеней свободы	Значения χ^2	Число степеней свободы	Значения χ^2
1	3,84	16	26,3
2	5,99	17	27,6
3	7,82	18	28,9
4	9,49	19	30,1
5	11,07	20	31,4
6	12,59	21	32,7
7	14,07	22	33,9
8	15,51	23	35,2
9	16,92	24	36,4
10	18,31	25	37,7
11	19,68	26	38,9
12	21,0	27	40,1
13	22,4	28	41,3
14	23,7	29	42,6
15	25,0	30	43,8

Если распределение случайной величины не подчиняется нормальному закону, то проверка однородности дисперсий может привести к ошибочным результатам.

Рассмотрим применение критерия Бартлетта для проверки однородности дисперсий. Матрица планирования предусматривала выполнение четырёх экспериментов. Первый был повторен пять раз, второй – шесть, третий и четвёртый – по четыре раза. При этом дисперсия первого эксперимента равна 3,5; второго – 4,22; третьего – 5,88; четвёртого – 11,36. Необходимо проверить, верна ли гипотеза об однородности дисперсий.

Дисперсия s_y^2 параметра оптимизации:

$$s_y^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N} fj}\left(\sum_{j=1}^{N} s_j^2 fj\right) = \frac{3,5\cdot 4 + 4,22\cdot 5 + 5,88\cdot 3 + 11,36\cdot 3}{15} = 5,79.$$

Вычисляем величину c:

$$c = 0,4343\left[1 + \frac{1}{3(4-1)}\left(\frac{1}{4}+\frac{1}{5}+\frac{1}{3}+\frac{1}{3}-\frac{1}{15}\right)\right] = 0,485.$$

Определяем Q:

$$Q = \frac{1}{c}\left\{ f \lg s_y^2 - \sum_{j=1}^{N} fj \lg s_j^2 \right\} =$$

$$= \frac{1}{0,485}(15\lg 5,79 - 4\lg 3,5 - 5\lg 4,22 - 3\lg 5,88 - 3\lg 11,36) = 1,37.$$

Табличное значение $\chi_т^2$ для трех степеней свободы (N –1 = 3) и 5% уровня значимости равно 7,82. Так как $Q < \chi_т^2$, то гипотеза однородности дисперсий принимается;

г) вычисляют коэффициенты b_i уравнения регрессии, дисперсии $s^2\{b_i\}$ коэффициентов регрессии и ошибки $s\{b_i\}$ в определении коэффициентов;

д) для каждого коэффициента регрессии находят расчётное значение t-критерия:

$$t_p = \frac{\{b_i\}}{s\{b_i\}}.$$

Сравнивают расчётное значение t_p с табличным значением t_m критерия. Табличное значение критерия находят для принятого уровня значимости и числа степеней свободы f, которое в рассматриваемом случае определяют по зависимости

$$f = \sum_{j=1}^{N} fj = \sum_{j=1}^{N} (n_j - 1).$$

Коэффициент значимости соответствует $t_p > t_m$ и незначимости при $t_p < t_m$. Статистически незначимые коэффициенты могут быть исключены из уравнения регрессии. При исключении статистически незначимых коэффициентов из уравнения оставшиеся коэффициенты пересчитывают с использованием метода наименьших квадратов;

е) определяют дисперсию адекватности:

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N} n_j(\overline{y}_j - \hat{y}_j)^2}{f} = \frac{\sum_{j=1}^{N} n_j(\overline{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k+1)},$$

где n_j – число параллельных экспериментов в j-й строке матрицы;

ж) проверяют гипотезу адекватности полученной модели с помощью F-критерия. Если $F_P < F_m$ для принятого уровня значимости и

соответствующих чисел степеней свободы, то модель считают адекватной. При $F_P > F_m$ гипотеза адекватности отвергается.

Обработка результатов эксперимента при отсутствии дублирования. Обработку результатов эксперимента в этом случае производят по следующей схеме:

а) для вычисления дисперсии s_y^2 воспроизводимости эксперимента выполняют несколько параллельных опытов в нулевой точке (в центре плана). При постановке опытов в нулевой точке все факторы находятся на нулевых уровнях. По результатам исследований в центре плана вычисляют дисперсию s_y^2 воспроизводимости эксперимента:

$$s_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1}\left[\sum_{u=1}^{n_0}(y_u - \overline{y})^2\right],$$

где n_0 – число параллельных экспериментов в нулевой точке; y_u – значение параметра оптимизации в u-м опыте; $\overline{y}$ – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в n_0 параллельных экспериментах;

б) закончив эксперимент, вычисляют коэффициенты модели. Свободный член b_0 определяют по формуле

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} y_j.$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, вычисляют, используя зависимость

$$b_i = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_{ij} y_j.$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия, определяют по формуле

$$b_{il} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_{ij} x_{lj} y_j, \qquad (5.70)$$

где i, l – номера факторов; j – номер строки или опыта в матрице планирования; y_j – значение параметра оптимизации в j-м опыте; x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения (±1) факторов i и l в j-м опыте;

в) проверяют статистическую значимость коэффициентов уравнения регрессии. Проверку значимости коэффициентов можно производить двумя способами:

– сравнением абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом;

– с помощью *t*-критерия.

При проверке значимости коэффициентов первым способом для определения доверительного интервала вычисляют дисперсии коэффициентов регрессии по зависимости (5.71):

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{N} s_y^2, \tag{5.71}$$

где $s^2\{b_i\}$ – дисперсия i-го коэффициента регрессии; N – число строк или опытов в матрице планирования.

Из формулы (5.71) следует, что дисперсии всех коэффициентов равны. Доверительный интервал Δb_i определяют по формуле (5.64). Значение t-критерия, входящего в эту формулу, находят по таблице для принятого уровня значимости и числа степеней свободы f, которое определяют по зависимости $f = n_0 - 1$. Коэффициент регрессии значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. При проверке значимости коэффициентов вторым способом вычисляют критерий $t_p = \dfrac{|b_i|}{s\{b_i\}}$ и сравнивают его с табличным t_m. Коэффициент является значимым, если $t_p > t_m$ для принятого уровня значимости и числа степеней свободы, определенного по формуле $f = n_0 - 1$. Критерий Стьюдента t вычисляют для каждого коэффициента регрессии. Статистически незначимые коэффициенты регрессии могут быть исключены из уравнения;

г) определяют дисперсию s_a^2 адекватности по формуле

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N} (y_j - \hat{y}_j)^2}{f} = \frac{\sum_{j=1}^{N} (y_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k+1)}, \tag{5.72}$$

где y_j – зафиксированное значение параметра оптимизации в j-м эксперименте; $\hat{y}_j$ – значение параметра оптимизации, вычисленное по модели для условий j-го эксперимента; f – число степеней свободы, которое для линейной модели определяется по зависимости $f = N - (k + 1)$, где k – число факторов;

д) проверяют гипотезу адекватности модели по F-критерию, используя для определения F_p-критерия формулу (5.66).

Если $F_p < F_m$ для принятого уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы, то модель считают адекватной. При $F_p > F_m$ гипотеза адекватности отвергается. В этом случае для получения адекватной модели принимают одно из следующих решений:

– переходят к планированию второго или более высокого порядка;

– уменьшают интервалы варьирования и ставят новый эксперимент, повторяя эти действия до получения адекватной линейной модели.

Если линейная модель адекватна, то переходят к методу крутого восхождения. Необходимо заметить, что крутое восхождение эффективно тогда, когда все коэффициенты при факторах значимы. Незначимость некоторых коэффициентов может получиться вследствие неудачно выбранных интервалов варьирования; включения факторов, не влияющих на параметр оптимизации; большой ошибки эксперимента.

Принятие решения в данной ситуации зависит от того, которая из трех гипотез выбрана. Если принята первая гипотеза, то изменяют интервалы варьирования по незначимым факторам и ставят новую серию экспериментов. Если принята вторая, то не влияющие факторы стабилизируют и исключают из экспериментов. Если принята третья гипотеза, то увеличивают число параллельных экспериментов. Увеличение их числа приводит к уменьшению дисперсии коэффициентов и величины доверительного интервала, в результате все или часть коэффициентов могут оказаться значимыми. Возможен случай, когда все коэффициенты, кроме b_0, незначимы, а модель адекватна. Такая ситуация чаще всего возникает из-за слишком узких интервалов варьирования или вследствие большой ошибки эксперимента. В этой ситуации возможны два решения: расширение интервалов варьирования или повышение точности эксперимента путём улучшения методики проведения и увеличения числа параллельных экспериментов.

Построение эмпирических формул по экспериментальным данным. Стремлением каждого экспериментатора является уложение результатов проведенных опытов в эмпирическую формулу и тем самым установление закономерностей изучаемых явлений. Для этого по виду вычерченной в прямоугольных координатах кривой необходимо

правильно выбрать уравнение, которому будет удовлетворять эта кривая.

Наиболее часто встречаются гиперболические, параболические и показательные (логарифмические) зависимости, хотя ими далеко не всегда исчерпываются все виды возможных экспериментальных кривых. Поэтому во многих случаях только опыт и аналитические навыки исследователя в выборе аппроксимирующих зависимостей по виду кривой могут избавить от необходимости многократного подбора уравнения.

Укажем на некоторые характерные признаки наиболее часто встречающихся зависимостей. Например, многочлены целых положительных степеней: $y = ax + b$; $y = ax^2 + bx + c$; $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$.

Многочлен первой степени (прямая линия) выражает равномерный рост или падение функции. Многочлен второй степени (парабола второго порядка) выражает равнозамедленное или равноускоренное изменение функции y и может иметь одну точку поворота изменения $y = f(x)$ (максимум или минимум). Многочлен третьей степени (парабола третьего порядка) может отразить две точки поворота функции, а многочлен n-й степени – $(n-1)$ точек поворота, т. е. $(n-1)$ экстремальных точек. В общем случае, чем выше степень многочлена, тем более сложные зависимости он может аппроксимировать.

При выборе уравнений эмпирических кривых следует учитывать общие рекомендации, перечисленные ниже.

– если начало координат – точка O – есть центр кривой, то уравнение может содержать только чётные (с постоянным членом) или только нечётные (без постоянного члена) степени x и y, так как уравнение должно одинаково удовлетворяться как значениями $+x, +y$, так и значениями $-x, -y$. Например, для гиперболы $x^m y^n = C$ характер расположения кривых относительно координат осей показан на рисунке 5.7;

– если кривая симметрична относительно оси Oy (или Ox), то x (или y) может входить в уравнение кривой только в чётной степени. Например, если кривая симметрична относительно оси y, то степень x должна быть чётна, так как одному значению y должны соответствовать два значения x, равные по величине и противоположные по знаку (рис. 5.8);

– если кривая симметрична относительно линии, делящей угол yOx пополам, то уравнение не изменяется от перемены x на y или y на x;

– если функция y возрастает на каком-нибудь отрезке кривой, то её производная $\dot{y}$ положительна; вторая же производная $\ddot{y}$ будет положительна лишь при вогнутости отрезка, а при выпуклости отрезка $\ddot{y}$ – отрицательна (рис. 5.9). Если y убывает, то производная $\dot{y}$ отрицательна; вторая производная $\ddot{y}$ будет отрицательна при вогнутости отрезка и положительна при выпуклости отрезка.

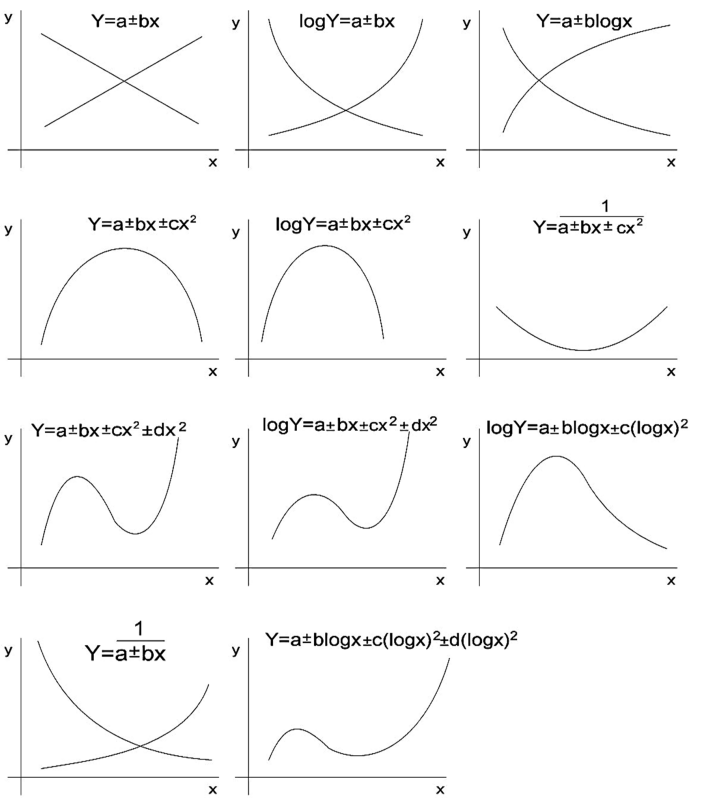


Рис. 5.7 – Некоторые часто встречающиеся аппроксимирующие зависимости

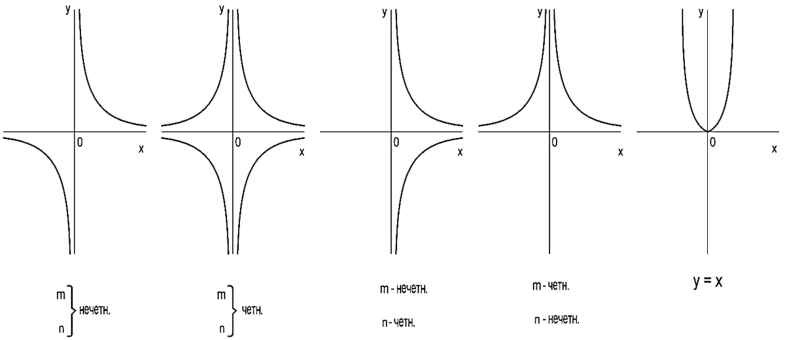


Рис. 5.8 – К определению показателей степеней аппроксимирующих зависимостей

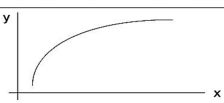
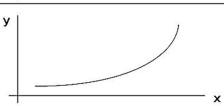
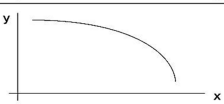
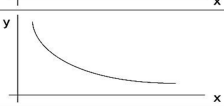
График кривой y = f(x)	Знаки ẏ , ÿ
	+,-
	+,+
	-,+
	−,−

Рис. 5.9 – К определению знаков производных функций

Могут встретиться случаи, когда получают ряд наблюдений над двумя переменными величинами, которые, будучи изображены в виде кривой, не укладываются хорошо ни в одну из простейших формул. Тогда приходится искать формулу с четырьмя и более постоянными или же, в крайнем случае, разбить кривую на два-три участка и

найти для каждого участка подходящую формулу, а затем пользоваться их комбинацией. Понятно, что последний способ приводит к весьма сложным вычислениям.

Если мы убедились, что опытная кривая не укладывается в простейшие формулы, нужно попытаться найти для неё формулу, представляющую сумму или разность двух-трёх простейших формул.

Интерполяция и экстраполяция функций. Применяя графоаналитический метод построения эмпирических уравнений, можно находить дискретные значения функции $y = f(x)$ как за отрезком узловых точек (определяющих границы изменения данной функции) (экстраполяция), так и между узловыми точками (интерполяция). Процессы интерполяции и экстраполяции особенно важны при проведении факторного эксперимента, когда по тем или иным причинам невозможно определить промежуточные значения отклика.

Одним из наиболее распространённых численных методов интерполирования, является метод, основанный на применении интерполяционной формулы Лагранжа:

$$y = y_1 \frac{x-x_2}{x_1-x_2} \cdot \frac{x-x_3}{x_1-x_3} \cdots \frac{x-x_n}{x_1-x_n} + y_2 \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \cdot \frac{x-x_3}{x_2-x_3} \cdots \frac{x-x_n}{x_2-x_n} + y_n \frac{x-x_1}{x_n-x_1} \cdot \frac{x-x_2}{x_n-x_2} \cdots \frac{x-x_{n-1}}{x_n-x_{n-1}} \quad (5.73)$$

Рассмотрим пример. В результате испытания двигателя внутреннего сгорания были получены следующие данные:

Нагрузка на двигатель, Н	220	440	660	875
Расход горючего, кг/ч	8,2	11,9	17,5	25,5

Предположим теперь, что данные по интересующему расходу топлива при нагрузке 440 Н или не были получены, или полученное значение вызывает сомнение. Какое расчётное значение расхода горючего в этом случае получается при использовании интерполяционной формулы Лагранжа?

Подставим в соответствии с используемыми символами в формулу Лагранжа следующие опытные данные:

Нагрузка на двигатель, Н	220(x_3)	660(x_2)	875(x_1)
Расход горючего, кг/ч	17 ,5(y_2)	17,5(y_2)	25,5(y_1)

Подставив значения x и y в формулу Лагранжа (5.73), получим

$$y = 25{,}5\frac{440-660}{875-660} \cdot \frac{440-220}{875-220} + 17{,}5\frac{440-875}{660-875} \cdot \frac{440-220}{660-220} + 8{,}2\frac{440-875}{220-875} \cdot \frac{440-660}{220-660} = 11{,}57.$$

Величина y, полученная в эксперименте, равна 11,9. Если нанести три точки (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) на график и провести через них плавную кривую, то получится значение, лежащее в интервале от 11,4 до 11,5.

Преимущество аналитического метода состоит в том, что он может применяться автоматически (с использованием ЭВМ) и впоследствии его можно продублировать каким-либо другим способом для получения интерполяционного значения.

При отсутствии значений расхода топлива, соответствующего $x_1 = 875$, можно было бы также воспользоваться формулой Лагранжа. Но эта формула не позволяет находить значения, лежащие далеко за пределами рассматриваемого интервала, т. е. экстраполировать результаты опыта. Однако если берется не слишком большой интервал экстраполяции, то формула Лагранжа может обеспечить приемлемую точность, и такой способ будет предпочтительнее графической экстраполяции.

Моделирование процесса при неполной информации о факторах. При исследовании ряда процессов, когда не все независимые, входящие в эксперимент, поддаются непосредственному измерению, но вместе с тем известно, что они существуют и влияют на результаты эксперимента, прибегают к методу, получившему название *анализа размерностей.*

Использование этого метода основано на теореме Букингема: если какое-либо уравнение однородно относительно размерностей, то его можно преобразовать к соотношению, содержащему набор безразмерных комбинаций величин. Например, форма уравнения кинетической энергии $T=\frac{1}{2}m\upsilon^2$ не изменится при выражении массы в фунтах, килограммах или тоннах, а скорости – в м/с, км/ч и т. д.

Так, в общем виде зависимость силы сопротивления качению колеса с жестким ободом P_f по грунту от ширины обода b колеса, его диаметра D нормальной нагрузки на колесо G, глубины колеи, коэффициентов буксования колеса δ и коэффициента деформируемости основания c можно записать в виде функционала

$$P_f = \varphi(b, D, h, c, G, \delta). \qquad (5.74)$$

Размерность переменных можно выразить через массу M, время T и длину L (табл. 5.20).

Таблица 5.20 – К применению метода анализа размерностей

Обозначение	P_f	b	D	h	c	G	δ
Формула размерности	$\frac{ML}{T^2}$	L	L	L	$\frac{ML}{T^2L^2}$	$\frac{ML}{T^2}$	–

Допустим теперь, что между этими величинами существует зависимость

$$P_f = \varphi(b^a, D^d, h^e, c^k, G^n, \delta^r). \qquad (5.75)$$

Подставим в (5.75) вместо символов размерности соответствующих величин и получим формулу

$$\frac{ML}{T^2} = \varphi\left[L^a, L^d, L^e, \left(\frac{ML}{T^2L^2}\right)^k, \left(\frac{ML}{T^2}\right)^n\right]. \qquad (5.76)$$

Чтобы данное уравнение было однородным относительно размерностей, должны выполняться следующие соотношения между показателями степени:

для L: $a + d + e - 2k + n = 1$;

для M: $k + n = 1$;

для T: $-2k - 2n = -2$.

Таким образом, мы получаем систему из трёх уравнений с пятью неизвестными. Выражая одни неизвестные через другие и подставляя полученные соотношения в (5.76), после объединения членов с одинаковыми показателями степени получим безразмерный функционал:

$$\frac{P_f}{G} = \varphi\left[\left(\frac{b}{D}\right)^a, \left(\frac{h}{D}\right)^d, \left(\frac{CD^3}{G}\right), \delta^r\right]. \qquad (5.77)$$

Как видим, анализ размерностей позволил нам из семи неизвестных (табл. 5.20) получить пять безразмерных комбинаций в уравнении (5.77) и тем самым сократить объём эксперимента.

На заключительном этапе, в процессе проведения эксперимента, мы должны установить численные значения показателей степени для комбинаций, входящих в выражение (5.77), и найти искомую зависимость удельного сопротивления качению $f_k = \frac{P_f}{G}$.

Построение эмпирических формул при наличии корреляционной связи между независимыми и зависимой переменными. Основная задача установления связи между независимыми и зависимы-

ми переменными состоит в том, чтобы на основе наблюдения над большим количеством данных определить, как изменяется функция (отклик) с изменением одного из своих аргументов (факторов), если другие её аргументы не изменяются. Во типовых случаях экспериментальных исследований показателей надёжности функция y и аргумент x не имеют между собой функциональной зависимости, хотя имеют между собой корреляционную связь. В этом случае каждому значению аргумента x (независимой переменной) соответствует не фиксированное значение функции y (зависимой переменной), а некоторое распределение y.

Подобный характер связи между величинами x и y объясняется тем, что каждый аргумент будет однозначно определять значение функции лишь в том случае, когда прочие аргументы оказывают на функцию исчезающе малое влияние, чего в действительности может и не быть, то есть действие рассматриваемого конкретного аргумента в каждом отдельном случае может перекрываться действием других факторов.

В связи с этим возникает настоятельная необходимость определения степени искажающего влияния прочих факторов на интересующую нас зависимость «основной фактор – отклик».

Задачи корреляции обычно решаются при заданных значениях аргумента x, являющемся величиной неслучайной. В этом случае мы имеем дело с задачей построения уравнения регрессии, устанавливающего связь между случайной величиной y и неслучайной величиной x.

Для выбора уравнения регрессии необходимо вначале соответствующим образом подготовить статистический материал. В результате такой подготовки составляется так называемая *корреляционная таблица.*

Проиллюстрируем этот подготовительный этап на следующем примере.

Исследуется зависимость веса машины G (кН) от мощности её двигателя $N_д$ (кВт). Здесь зависимой переменной является вес машины y, а независимой переменной – мощность двигателя x.

Весь диапазон изменения каждой из этих переменных разобьем на небольшие группы (интервалы). Например, для переменной x выделим семь интервалов: первый интервал – 45–55 кВт, второй интервал – 55–65 кВт и т. д. Переменную y также разобьем на семь интер-

валов – 45–55 кН; 55–65 кН и т. д. По результатам такого разбиения строим корреляционную таблицу (табл. 5.21).

Внутренние клетки таблицы 5.21 содержат частоты появления p_i машин с параметрами, оказавшимися в соответствующих интервалах x и y по данным 122 опытов. Итоговая строчка для каждого интервала y представляет собой суммарную частоту для всех интервалов x, а итоговый столбец для каждого интервала x соответствует суммарной частоте для всех интервалов y.

Таблица 5.21 – Корреляционная таблица

y \ x	x_1 45–55	x_2 55–65	x_3 65–75	x_4 75–85	x_5 85–95	x_6 95–105	x_7 105–115	Итого
105–115		1			1	2	5	9
95–105			1				3	4
85–95			1	1	3	17	6	28
75–85			1	6	2	21	2	32
65–75	3	3	1	7	10	4	1	29
55–65	1	2		3	5	2		13
45–55	2	1		4				7
Итого	6	7	4	21	21	46	17	122

Таким образом, корреляционная таблица систематизирует результаты статистической совокупности по двум переменным – x и y, варьируемым в соответствующих диапазонах.

По данным таблицы 5.21 рассчитываем средние значения для всех рядов распределения y, соответствующих заданным значениям x.

Покажем этот расчёт на примере только для трех интервалов x = (45–55), x = (55–65) и x = (65–75).

Среднее значение интервала:

$$\overline{x}_i = \frac{45+55}{2} = 50.$$

Для этого интервала вычисляем средние и средневзвешенные значения y (табл. 5.22).

Таблица 5.22 – К вычислению средних и средневзвешенных величин отклика

y_i–y_{i+10}	$\bar{y}_i$	p_i	$p_i\bar{y}_i$
65–75	$\frac{65+75}{2}=70$	3	210
55–65	$\frac{55+65}{2}=60$	1	60
45–55	$\frac{45+55}{2}=50$	2	100
		$\sum p_i=6$	$\sum p_i\bar{y}_i=370$

Отсюда находим средневзвешенное значение:

$$\tilde{y}_i=\frac{\sum p_i^{\circ}y_i}{\sum p_i^{\circ}}=\frac{370}{6}=61{,}27\,.$$

Для второго интервала переменной x:

$$\bar{x}_2=\frac{55+65}{2}=60.$$

Этому значению x_2 соответствует в таблице 5.21 (столбец x_2) следующий ряд распределения переменной y (табл. 5.23).

Таблица 5.23 – Ряд распределения переменной y

y_i–y_{i+10}	$\bar{y}_i$	p_i	$p_i\bar{y}_i$
105–115	$\frac{105+115}{2}=110$	1	110
95–105	$\frac{95+105}{2}=100$	0	0
85–95	$\frac{85+95}{2}=90$	0	0
75–85	$\frac{75+85}{2}=80$	0	0
65–75	$\frac{65+75}{2}=70$	3	210
55–65	$\frac{55+65}{2}=60$	2	120
45–55	$\frac{45+55}{2}=50$	1	50
		$\sum p_i=7$	$\sum p_i\bar{y}_i=490$

Отсюда $\tilde{y}_1 = \frac{\sum p_i' y_i}{\sum p_i'} \frac{490}{7} = 70{,}0$.

Найденным средним и средневзвешенным значениям $\bar{x}$ и $\tilde{y}$ соответствуют частоты p_i, указанные в корреляционной таблице 5.21. Теперь можно составить аналогичную корреляционную таблицу, в которой интервалы переменных x и y заменены соответствующими средними значениями этих переменных. По данным такой таблицы в координатах $\bar{x}$ и $\tilde{y}$ на графике наносим точки всех 122 опытов. На этом графике каждому значению аргумента x будет соответствовать ряд распределения функции y; с изменением x эти ряды закономерно изменяют свое положение. Совокупность точек, нанесенных на график, образует так называемое корреляционное поле.

Если из середины интервалов аргумента $\bar{x}_i$ восстановим ординаты, соответствующие значениям $\tilde{y}_i$, и вершины этих ординат последовательно соединим прямыми линиями, то в общем случае на графике корреляционного поля получим ломаную линию, называемую эмпирической линией регрессии y по x. Эта линия показывает, как смещаются ряды распределения y с увеличением x или как в среднем изменяется y с увеличением x.

Общий тренд линии регрессии нарушается локальными переломами-зигзагами, которые имеют случайный характер: они сильнее на тех участках линии, где частота наблюдений мала, и уменьшаются в тех частях графика, которые проходят среди большого числа точек корреляционного поля.

В силу закона больших чисел можно утверждать, что по мере увеличения числа наблюдений случайные зигзаги линии будут сглаживаться, и линия регрессии будет принимать все более правильный, закономерный характер.

Предельное положение эмпирической линии регрессии, к которому она стремится при неограниченном увеличении числа наблюдений при одновременном уменьшении величины интервала аргумента, называется предельной теоретической линией регрессии.

Очевидно, что переменная y будет находиться в корреляционной зависимости от x, если: 1) каждому значению аргумента x соответствует ряд распределения функции y; 2) предельная теоретическая линия регрессии y по x не параллельна оси абсцисс.

Если же предельная теоретическая линия регрессии y по x параллельна оси абсцисс, то y корреляционно не зависит от x.

Понятие корреляционной зависимости является частным случаем более общего понятия – статистической зависимости, которой можно дать следующее определение: переменная y будет находиться в статистической зависимости от x, если:

– каждому значению x соответствует ряд распределения y;

– с изменением x эти ряды закономерно изменяются.

Очевидно, что всякая корреляционная зависимость является одновременно статистической зависимостью. Однако не всякая статистическая зависимость является корреляционной, так как для статистической зависимости важно не только изменение положения рядов распределения, но и изменение рассеяния переменной y при изменении x, степени асимметрии и другие особенности, характеризующие форму кривой распределения.

Из определения предельной теоретической линии регрессии вытекает и прямой путь её нахождения: необходимо увеличить число наблюдений и сократить интервалы группировки аргумента до таких значений, при которых лежащая в основе корреляционная зависимость между переменными y и x не выявится с удовлетворяющей нас точностью.

Но такой путь практически недоступен исследователю, который чаще всего имеет дело с весьма ограниченным числом наблюдений. Чтобы в этих условиях обнаружить закономерность, отчётливо проявляющуюся лишь в массе наблюдений, необходимо обратиться к косвенным приемам анализа.

Одним из таких приемов является построение теоретической линии регрессии, моделирующей действительную линию, получаемую по результатам большого числа наблюдений.

Экспериментальное определение экстремальных значений. В зависимости от поставленной цели исследования в результате их проведения всегда возникает проблема принятия решения. В большинстве случаев принятие решения связано с предварительной обработкой результатов эксперимента и определением экстремумов процесса – максимумов, минимумов или их совокупностей. Однако эта, казалось бы, простая задача становится затруднительной вследствие дефицита экспериментальных данных и требует применения специальных математических методов.

Определение экстремальных значений отклика, а в ряде случаев и действующих факторов, осуществляется методами оптимизации. В этом случае задача оптимизации ставится таким образом: необходимо экспериментально найти координаты многомерной точки $X_1^{onm}, X_2^{onm},\ldots,X_k^{onm}$, при которых целевая функция достигает экстремума. При поиске экстремума предполагается, что целевая функция, моделирующая процесс, является гладкой, непрерывной, и в области исследования имеется единственный экстремум. Пример такой функции для случая двух факторов – холм с одной вершиной.

Одномерный поиск экстремумов производится в основном для однофакторных экспериментов, но в ряде случаев и многофакторных. Различают методы активного и пассивного поиска. При пассивном поиске область исследования разбивают на участки равной длины:

$$l_N = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{N+1}. \qquad (5.78)$$

Методом перебора находим X^{onm} и Y^{onm}. При активном поиске выбор значений X в области исследования зависит от результатов предшествующих опытов. Имеет место накопление и активное использование информации о свойствах целевой функции. Пошаговое проведение опытов более эффективно, так как позволяет сократить время и средства.

Наиболее простыми методами *одномерной оптимизации* являются методы *дихотомии*, *золотого сечения* и *Фибоначчи*. Идея этих методов заключается в том, что по двум значениям X_1, X_2, симметрично расположенных в области исследования $X_{\min} \prec X_1 \prec X_2 \prec X_{\max}$, можно указать интервал меньше первоначального, в котором находится точка экстремума.

Идея *метода дихотомии* заключается в следующем: на первом этапе эксперимента относительно центра области исследования размещают две новые точки и проводят эксперимент, затем процедура повторяется на новом отрезке (рис. 5.10).

Координаты выбирают по формулам:

$$X_1 = \frac{(X_{\max} + X_{\min} - \delta)}{2}, \qquad (5.79)$$

$$X_2 = \frac{(X_{\max} + X_{\min} + \delta)}{2}, \qquad (5.80)$$

где δ – регламентированная точность измерения.

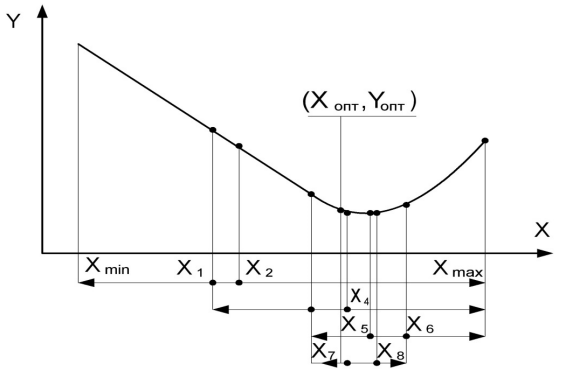


Рис. 5.10 – Схема поиска экстремума по методу дихотомии

Координаты экспериментальных точек на последующих этапах исследования определяются по вышеуказанным формулам с учётом новых границ. Длина интервала неопределенности после проведения k-й пары опытов:

$$l_N = \frac{L}{2^k} + \left(1 - \frac{1}{2^k}\right)\delta . \qquad (5.81)$$

Задаваясь допустимой относительной погрешностью ε локализации точки экстремума, можно найти число наблюдений N, необходимых для обеспечения желаемой точности:

$$\varepsilon \geq \frac{l_N}{L}; \quad L = X_{\max} - X_{\min}; \quad \varepsilon \geq \frac{l_N}{L} = \frac{1}{2^k} + \left(1 - \frac{1}{2^k}\right)\frac{\delta}{L}.$$

Следует задаваться такой относительной погрешностью, чтобы ошибка была не меньше $\frac{2\delta}{L} \leq \varepsilon \left(x \pm \delta\right)$.

Метод Фибоначчи более эффективен, чем метод дихотомии, так как позволяет сократить число опытов при одинаковой области исследования. Реализация метода связана с последовательностью целых чисел, открытых итальянским математиком Леонардо Фибоначчи. В этом методе две новые точки X_1, X_2 берут на равном расстоянии от концов области исследования. Исходя из чисел Фибоначчи F_N = 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, …, которые определяются ре-

куррентными соотношениями $F_N = F_{N-1} + F_{N-2}$, $F_0 = F_1 = 1$, определяются значения X_1 и X_2 по формулам:

$$X_1 = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})\frac{F_{N-2}}{F_N}; \tag{5.82}$$

$$X_2 = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})\frac{F_{N-1}}{F_N}. \tag{5.83}$$

Планирование эксперимента производится следующим образом: вначале определяется необходимое число опытов N, так как оно используется при расчёте X_1, X_2. Для определения N задаются относительной погрешностью измерения δ. Тогда N находят из соотношения

$$\varepsilon \succ \frac{l_N}{L} = \frac{1}{F_N} + \frac{F_{N-2}}{F_N}\frac{\delta}{L}, \tag{5.84}$$

где l_N – интервал неопределенности, $l_N = \frac{L}{F_N} + \frac{F_{N-2}}{F_N}\delta$.

В каждой очередной интервал неопределенности попадает один предыдущий эксперимент (рис. 5.11). Для продолжения поиска новую точку следует располагать симметрично оставшейся.

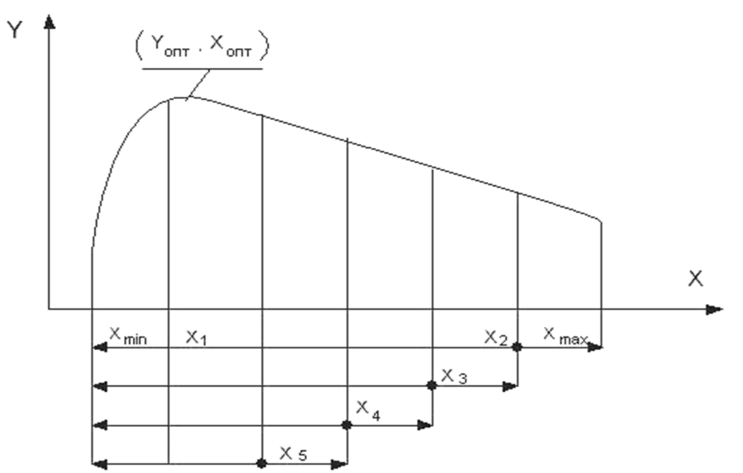


Рис. 5.11 – Схема поиска экстремума по методу Фибоначчи

Метод золотого сечения занимает промежуточное положение между методами дихотомии и Фибоначчи. Координаты точек берут из соотношений:

$$X_1 = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})\tau^2; \quad (5.85)$$

$$X_2 = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})\tau, \quad (5.86)$$

где $\tau^2 = 0{,}382$; $\tau = 0{,}618$.

Деление отрезка подобным образом восходит к Евклиду и называется золотым сечением. Процедура планирования эксперимента аналогична методу Фибоначчи (см. рис. 5.11):

$$l_N = (X_{\max} - X_{\min})\tau^{N-1}. \quad (5.87)$$

Количество опытов может быть найдено из условия

$$\varepsilon \geq \frac{l_N}{L} = (0{,}618)^{N-1}. \quad (5.88)$$

Из сопоставления трёх одномерных методов следует, что наиболее эффективным из них является метод Фибоначчи. Несколько меньшую эффективность обнаруживают соответственно методы золотого сечения и дихотомии.

К экспериментальным методам многомерного поиска относятся метод Гаусса – Зайделя, метод крутого восхождения и симплекс-метод.

В основе *метода Гаусса – Зайделя* идея координатного поиска, например, для двухфакторной модели вначале выбирают направление поиска по фактору X_1 при фиксированном значении X_2. Для поиска экстремума используются одномерные методы. Далее движение начинают вдоль новой координатной оси (рис. 5.12). Когда ни по одной из осей невозможно увеличение Y, поиск прекращается и полученная точка принимается за экстремальную.

Недостаток состоит в том, что при большом числе факторов (k) путь к вершине получается извилистым; это требует большого числа опытов.

Для поиска оптимальных условий по *методу крутого восхождения* достаточно построения линейной модели:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \ldots + b_k x_k = b_0 + \sum_{j=1}^{k} b_j x_j.$$

Необходимо найти точку $x_1^*, x_2^*, \ldots, x_k^*$, в которой целевая функция Y достигает экстремума. Один из кратчайших путей – это движение от данной точки к вершине, в направлении наиболее крутого склона, совпадающего с направлением градиента (см. рис. 5.12). Градиент – это вектор, указывающий наискорейшее изменение функции при переходе из одной точки пространства в другую:

$$grad\ u = \frac{\partial u}{\partial x_1}\vec{i} + \frac{\partial u}{\partial x_2}\vec{j} + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_n}\vec{k}, \qquad (5.89)$$

где $\frac{\partial u}{\partial x_j}$ – частная производная по j-му фактору; (i, j, k) – орты, совпадающие с направлением осей.

Для линейной модели частные производные равны $b_1, b_2, \ldots, b_k$, тогда $grad\ u = b_1\vec{i} + b_2\vec{j} + \ldots + b_k\vec{k}$. Из формулы следует, что для осуществления движения по градиенту вес значения факторов по каждой из осей (i, j, k) необходимо изменять пропорционально величинам коэффициентов $b_1, b_2, \ldots, b_k$. Рассмотрим технологию движения по $grad$ для линейной однофакторной модели $Y = b_0 + b_1x_1$.

Поскольку $b_1 = \frac{\partial u}{\partial x}$, то он равен тангенсу угла наклона между линией регрессии и осью фактора.

Обобщение для многофакторной модели делается механически, так как все коэффициенты модели определяются независимо друг от друга. При этом движение по всем осям факторов осуществляется одновременно. Процедура поиска экстремума состоит в следующем: вначале выбирают начальную точку s, в окрестности которой на основе малой серии опытов находят локальное описание поверхности целевой функции с помощью модели линейного типа. Далее находят направление градиента и в этом направлении планируют «мысленные» опыты (рис. 5.12).

Серия «мысленных опытов» рассчитывается последовательным прибавлением к основным уровням факторов величин, пропорциональных произведению соответствующего коэффициента на интервал варьирования. Потом находят базовый фактор, для которого произведение $b_j\Delta x_j$ было максимальным по абсолютной величине, и для него вычисляют базовый шаг: $\Delta_{баз} = \mu\Delta x_{баз}$, где $\Delta x_{баз}$ – интервал варьирования.

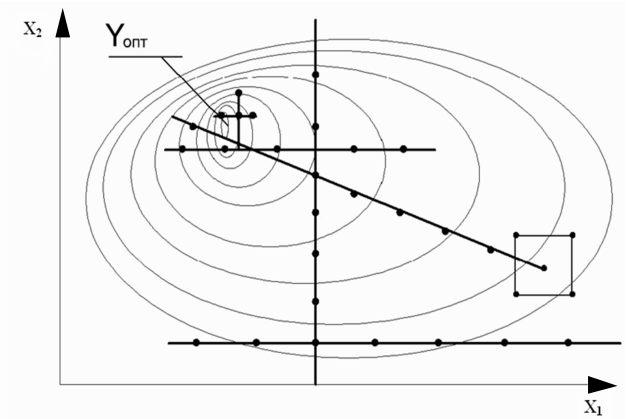


Рис. 5.12 – Схема поиска экстремума методами Гаусса – Зайделя и крутого восхождения

После этого рассчитывают единичные шаги для всех остальных факторов по формуле $\frac{\Delta_i}{\Delta_{баз}} = \frac{b_i \Delta x_i}{b_{баз} \Delta x_{баз}}$ и полученное значение округляют.

Все шаги рассчитывают в натуральном масштабе. Полученные таким образом шаги последовательно прибавляют к основным уровням факторов или вычитают из них (в зависимости от знака b_i и от того, что ищут – максимум или минимум). Для качественных факторов фиксируют лучший уровень, для незначимых факторов стабилизируют на любом уровне в интервале (+1; –1). Обычно рассчитывают до 10 мысленных опытов. Реализацию мысленных опытов начинают с опыта, условия которого выходят из области эксперимента хотя бы по одному из факторов. Обычно проводят 3–4 опыта и по их результатам принимают решение о прекращении поиска или дальнейшем проведении эксперимента. Если одного линейного приближения недостаточно, то ставится новая серия мысленных опытов до достижения экстремумов.

Симплекс-метод – это метод поиска экстремума целевой функции, обеспечивающий минимальное число опытов при небольшом объёме вычислений. Метод может использоваться при управлении

технологическими процессами с учётом изменяющихся условий производства.

Симплекс – это простейший выпуклый многогранник, образованный $(k+1)$ вершиной общего положения в k-мерном пространстве. На плоскости симплекс образуется тремя точками, не лежащими на одной прямой (любой треугольник). В трехмерном пространстве симплекс образуется любыми 4 точками, не лежащими в одной плоскости, т. е. это любая треугольная пирамида. Симплекс называется правильным, или регулярным, если все расстояния между образующими его вершинами равны. Регулярными симплексами являются правильный треугольник, тетраэдр и т. д. Таким образом, точка – это нуль-мерный симплекс, а отрезок прямой – одномерный симплекс.

Из любого симплекса можно, отбросив одну из вершин и используя оставшуюся грань, получить новый симплекс, добавив всего одну точку. Путём последовательного отбрасывания вершин можно осуществлять движение симплекса в факторном пространстве, причем это перемещение будет происходить с каждым экспериментом (рис. 5.13).

Если провести эксперимент в вершинах симплекса, то направление максимального наклона поверхности Y (направление градиента), определенное на основании проведенных наблюдений, будет проходить из центра симплекса через грань, противолежащую вершине с минимальным значением Y. При этом предполагается, что поверхность Y в области, ограниченной симплексом, близка к плоскости.

Для продвижения к экстремуму необходимо перейти от исходного симплекса к симплексу, находящемуся в области более высокого значения Y, путём отбрасывания вершины с минимальным значением Y и построением на оставшейся грани симплекса с новой вершиной, являющейся в силу симметрии зеркальным отражением отброшенной. Затем процесс отбрасывания вершины с минимальным значением Y и построения нового симплекса повторяется, в результате чего формируется цепочка симплексов, перемещающихся к экстремуму. Достигнув области экстремума, симплекс начинает вращение вокруг вершины с максимальным значением Y. Это явление используется для определения конца процесса оптимизации.

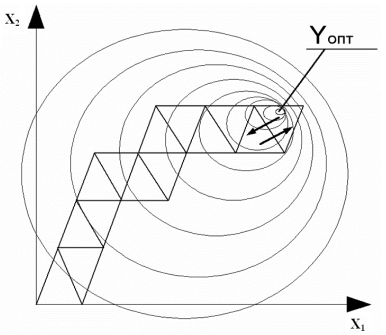


Рис. 5.13 – Схема поиска экстремума симплекс-методом

Правильный k-мерный симплекс с центром в начале координат может быть задан матрицей:

$$\begin{vmatrix} -r_1 & -r_2 & -r_3 & \cdots & -r_{k-1} & -r_k \\ R_1 & -r_2 & -r_3 & \cdots & -r_{k-1} & -r_k \\ & R_2 & -r_3 & \cdots & -r_{k-1} & -r_k \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & R_{k-1} & -r_k \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & R_k \end{vmatrix},$$

где R_i, r_i – соответственно радиусы гиперсфер, описанных и вписанных около i-мерного симплекса.

При длине ребра симплекса, равного единице, радиусы гиперсфер определяются по формулам:

$$R_i = \sqrt{\frac{i}{2(i+1)}}, \qquad (5.90)$$

$$r_i = \frac{1}{\sqrt{2i(i+1)}}, \qquad (5.91)$$

где $i = 1, 2, 3, \ldots, k$.

Координаты экспериментальных точек, соответствующих вершинам симплекса, можно представить в виде данных, приведенных в таблице 5.24.

Из структуры матрицы видно, что увеличение факторного пространства на единицу влечёт добавление одной строки и одного

столбца, соответствующих дополнительной экспериментальной точке. Координаты вершин определяются строками матрицы. Одна из вершин лежит на оси x_k, а остальные вершины располагаются симметрично относительно координатных осей.

Таблица 5.24 – К использованию симплекс-метода

№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	…	x_k	y
1	0,5	–0,289	–0,204	–0,158	–0,129	…	$r=-\frac{1}{\sqrt{2k(k+1)}}$	y_1
2	0,5	–0,289	–0,204	–0,158	–0,129	…		y_2
3	0	0,578	–0,204	–0,158	–0,129	…		y_3
4	0	0	0,612	–0,158	–0,129	…		y_4
5	0	0	0	0,623	–0,129	…		y_5
6	0	0	0	0	0,645	…		y_6
…	…	…	…	…	…	…		…
$k+1$	0	0	0	0	0	…	$R_1=\sqrt{\frac{k}{2(k+1)}}$	y_{k+1}

Для двух факторов имеем:

$$i=1,\quad R_1=\sqrt{\frac{1}{2(1+1)}}=0,5;\quad r_1=\frac{1}{\sqrt{2(1+1)}}=0,5;$$

$$i=2,\quad R_2=\sqrt{\frac{2}{2(2+1)}}=0,578;\quad r_1=\frac{1}{\sqrt{2\cdot 2(2+1)}}=0,289.$$

Тогда координаты вершин симплекса в табличном и графическом (рис. 5.14) видах представляются следующим образом:

N	x_1	x_2
1	$-r_1$	$-r_2$
2	R_1	$-r_2$
3	0	R_2

N	x_1	x_2
1	–0,5	–0,289
2	0,5	–0,289
3	0	0,578

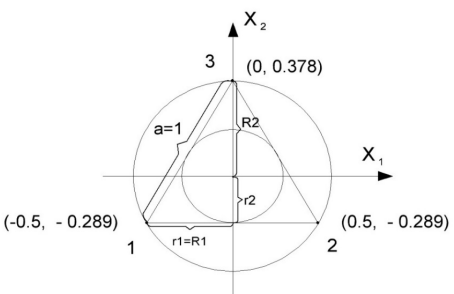


Рис. 5.14 – Двухмерный симплекс

Методика принятия решений. Выбор является действием, придающим всей деятельности целенаправленность. Именно выбор предопределяет подчиненность всей деятельности определенной цели или совокупности целей. Рано или поздно наступает момент, когда дальнейшие действия могут быть различными, приводящими к разным результатам, а реализовать можно только одно действие, причем вернуться к ближайшей предшествующей ситуации в большинстве случаев уже нельзя.

Естественно стремление понять, что такое «оптимальный выбор», выработать рекомендации о нахождении кратчайшего пути к наилучшему решению, а если возможно – предложить алгоритм получения такого решения. Полная формализация нахождения наилучшего решения возможна только для хорошо структурированных задач; для решения слабо структурированных задач законченных формальных алгоритмов не существует, не считая алгоритма перебора, т. е. метода проб и ошибок, который условно приемлем для решения весьма ограниченного круга задач. В то же время опытные специалисты, в том числе исследователи, обладающие высокими аналитическими способностями, часто делают выбор, оказывающийся единственно приемлемым. Необходимо констатировать, что тенденция практики выбора в типичных и нестандартных ситуациях объединяет способности человека решать неформализованные задачи с возможностями формальных методов и компьютерного моделирования, к которым относятся диалоговые системы поддержки решений, системы управления базами данных, информационно-поисковые системы, автоматизированные системы управления, экспертные системы и т. п.

Принятие решения необходимо представлять как действие над множеством альтернатив, в результате которого получается подмножество выбранных альтернатив, нередко это одна альтернатива. Сужение множества альтернатив возможно, если имеется способ сравнения альтернатив между собой и определения наиболее предпочтительных. Каждый такой способ называют критерием предпочтения. При этом обратим внимание на то, что любому выбору предшествуют два обязательных этапа:

– формирование множества альтернатив, на котором предстоит осуществлять выбор;

– определение целей, для достижения которых производится выбор.

В практике системного анализа реализация этих этапов связана с определенными трудностями, для преодоления которых необходимы индивидуальные приемы и методы.

Каждая компонента процедуры выбора может реализоваться в различных вариантах, в том числе:

– *множество альтернатив* может быть конечным, счётным или континуальным;

– *оценка альтернативы* может осуществляться по одному или по нескольким критериям, которые могут иметь как количественный, так и качественный характер;

– *режим выбора* может быть однократным или повторяющимся, допускающим обучение на опыте;

– *последствия выбора* могут быть точно известны (*выбор в условиях определенности*), иметь вероятностный характер, когда известны вероятности возможных исходов после сделанного выбора (*выбор в условиях риска*), или иметь неопределённый исход, не допускающий даже вероятностного подхода к прогнозированию исхода (*выбор в условиях неопределенности*);

– *ответственность за выбор* может быть односторонней (в предельном случае индивидуальной) или многосторонней. Соответственно, различают индивидуальный и групповой выбор;

– *степень согласованности целей* при многостороннем выборе может варьироваться от полного совпадения интересов сторон (*кооперативный выбор*) до их противоположности (*выбор в конфликтной ситуации*). Возможны также промежуточные случаи, например *компромиссный выбор, коалиционный выбор* и т. д.

Наиболее простым и развитым языком описания выбора является *критериальный язык*, по правилам которого каждую отдельно взятую альтернативу можно оценить конкретным количественным или качественным значением критерия, и сравнение альтернатив сводится к сравнению значений критериев или чаще всего соответствующих им чисел.

Пусть x – некоторая альтернатива из множества X. Считается, что для всех $x \in X$ может быть задана функция $q(x)$, которая называется критерием (критерием качества, целевой функцией, функцией предпочтения и др.) и обладает тем свойством, что если альтернатива x_1 предпочтительнее альтернативы x_2 (будем обозначать это $x_1 \succ x_2$), то $q(x_1) \succ q(x_2)$ и обратно.

Если предположить, что выбор любой альтернативы приводит к однозначно известным последствиям (выбор осуществляется в условиях определенности) и заданный критерий $q(x)$ численно выражает оценку этих последствий, то наилучшей альтернативой x^* является, естественно, та, которая обладает наибольшим значением критерия:

$$x^* = \arg\max_{x \in X} q(x).$$

Задача определения x^*, простая по постановке, часто оказывается сложной для решения, поскольку метод её решения, как и сама возможность решения, определяются: характером множества X (размерностью вектора x); типом множества X (по его принадлежности к конечным, счётным или континуальным множествам); характерным признаком критерия (принадлежность $q(x)$ к определённым классам функций или функционалов).

Однако сложность отыскания наилучшей альтернативы существенно возрастает, так как на практике оценивание любого варианта единственным числом обычно оказывается неприемлемым упрощением. Более полное рассмотрение альтернатив приводит к необходимости оценивать их не по одному, а по нескольким критериям, качественно различающимся между собой.

Для оценивания альтернатив используется несколько критериев $q_i(x)$, $i = 1, \ldots, p$. Теоретически можно представить себе случай, когда в множестве X окажется одна альтернатива, обладающая наибольшими значениями всех p критериев; она и является наилучшей. Однако на практике такие случаи почти не встречаются, и возникает вопрос определения рационального количества альтернатив и оптимальных значений их критериев.

Поиск оптимального решения по нескольким критериям в задачах техники всегда был актуальным. В любом техническом устройстве имеются такие его характеристики, количественные значения которых желательно максимизировать или минимизировать.

Но между отдельными характеристиками существует взаимная зависимость и действует ряд ограничений. В результате этого оказывается, что вне некоторой области, называемой областью согласия, увеличение одних характеристик неизбежно влечёт за собой уменьшение других, причем тех, численное значение которых тоже желательно увеличить, и наоборот.

В течение длительного времени применительно к подобным внутренним противоречиям технических задач поступали следующим образом: из множества характеристик выбирали одну, наиболее важную в рассматриваемой задаче, и ставили условие её максимизации при условии соблюдения определенных ограничений. При этом остальные характеристики либо попадали под категорию ограничений, либо по умолчанию принимались такими, какими они получались при максимизации основной характеристики. Подобные задачи относятся к классу однокритериальных или одноцелевых. Для их решения создан и успешно применяется развитый математический аппарат, в том числе аппарат исследования операций.

Однако если максимизация одной из наиболее важных характеристик системы влечёт за собой неприемлемое снижение другой существенной характеристики, то однокритериальный подход к решению задачи оптимизации уже некорректен или абсолютно неприемлем.

В зависимости от того, в каком виде проявляется действие различных критериев, многокритериальные задачи могут быть разбиты на несколько классов.

Класс 1. Множество качеств. При выборе решения должны приниматься во внимание несколько характеристик (качеств) объекта. Обычно в задачах этого класса частные критерии (ЧК) имеют различную размерность и физическую природу.

Класс 2. Множество объектов. Здесь система состоит из ряда объектов, качество функционирования каждого из которых описывается своим ЧК, а эффективность системы описывается совокупностью ЧК.

Класс 3. Множество условий. Техническая система должна функционировать в различных условиях, для каждого из которых качество функционирования характеризуется индивидуальным ЧК. При этом эффективность системы определяется совокупностью величин критериев для каждого из условий. В задачах этого класса ЧК имеют одинаковую природу и размерность.

Класс 4. Множество этапов. Техническая система функционирует в течение ряда этапов (как правило, временных), причем качество функционирования на каждом этапе функционирования характеризуется своим ЧК. Эффективность системы зависит от её функционирования на всех этапах и, следовательно, выражается обобщённым ЧК, составляющими которого будут частные, поэтапные критерии.

Класс 5. Множество вариантов постановки задач. В системах этого класса уже на этапе постановки задачи возникает неопределенность, например, качество функционирования системы зависит от значения некоторого параметра, о котором известна лишь область его возможных значений и зависимость ЧК от численного значения параметра.

Все известные методы векторного синтеза оптимальной системы непосредственно или косвенно сводятся к скалярному синтезу. Иначе говоря, ЧК показателя x_i ($i = 1, \ldots, n$) тем или иным способом объединяются в критерий $x = f(x_i)$, который затем максимизируется (минимизируется). Если составной критерий получается в результате расширения области исследования, вплоть до проникновения в физическую суть функционирования системы и установления объективно существующей взаимосвязи между частными критериями и составным критерием, то и оптимальное решение можно считать объективным. Однако отыскание взаимосвязей такого уровня чрезвычайно сложно и, более того, не всегда возможно и необходимо. Поэтому на практике составной критерий обычно формируют путём формального объединения ЧК, что неизбежно приводит к субъективности получаемого оптимального решения.

Знания аналитического вида зависимости составного критерия от ЧК не требуется, если решение ищется на основе *безусловного критерия предпочтения* (БКП). Последнее означает, что если для двух систем, характеризующихся индивидуальными ЧК, выполняется неравенство

$$X_i^{(1)} \geq X_i^{(2)}, \tag{5.92}$$

в том числе хотя бы для одного i неравенство выполняется строго, то система 1 предпочтительнее системы 2. Но в общем случае БКП не позволяет получить окончательного решения задачи выбора, а дает возможность найти лишь область компромисса, в которой находится и оптимальное решение. Ограниченные возможности БКП являются предпосылками разработки методов, основанных на формировании составного (обобщенного) критерия.

Обобщенный критерий можно назвать *условным критерием предпочтения* (УКП), поскольку с его помощью осуществляется поиск оптимального решения-максимума УКП в области компромисса, т. е. в той области, где одно или несколько условий не выполняются.

Если функциональная зависимость обобщенного критерия от ЧК установлена, то оптимальное решение найти нетрудно.

Рассмотрим для простоты случай одного ограничения:

$$F(x_i) \le C \quad (i = 1, \ldots, n). \tag{5.93}$$

Если найден обобщенный критерий:

$$X = f(X_i), \tag{5.94}$$

то оптимальным будет такое решение, которое дает максимум выражения (5.94) при выполнении условия (5.93). Для отыскания максимума $X_{\max}$ и оптимальных значений X_{iopt} ($i = 1, \ldots, n$), формирующих этот максимум, можно воспользоваться, например, методом неопределенных множителей Лагранжа. Это образует вспомогательную функцию

$$\Phi(X_i) = f(x_i) + \lambda\left|F(x_i) - C\right|, \tag{5.95}$$

где λ – неопределенный множитель,
и затем приравнивают к нулю частные производные этой функции по критериям x_i:

$$\frac{\partial \Phi(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_j} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_j} = \frac{\partial F(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_j} = 0. \tag{5.96}$$

В результате получают уравнение типа (5.96) с $n + 1$ неизвестными: x_1, x_2, ..., x_n, λ. В сочетании с условием (5.92) всего мы имеем $n + 1$ уравнений. Их совместное решение дает оптимальные значения ЧК x_{1opt}, x_{2opt}, ..., x_{nopt} и максимум обобщенного критерия:

$$X_{\max} = f(x_{iopt}, x_{2opt}, \ldots, x_{nopt}). \tag{5.97}$$

Если на систему действует не одно, а два и более ограничений вида (5.92), то во вспомогательное уравнение (5.95) вводятся в виде слагаемых все эти ограничения, каждое со своим неопределенным множителем. После этого задача решается по той же схеме, что была приведена выше. Заметим, что, приравнивая нулю частные производные, надо убедиться в том, что найден экстремум, а не точка перегиба. Это выполняется обычными приемами, рассмотренными в настоящем разделе.

5.4. Экспертные методы оценки надёжности

Многие важные факторы, влияющие на показатели надёжности машин, весьма трудно выделить, формализовать и, естественно, анализировать. Например, отсутствие достоверной информации о соблюдении периодичности технических обслуживаний, случаях перефорсирования режимов работы систем и агрегатов машины, общее несоблюдение правил эксплуатации и целый ряд других факторов относятся к трудно формализуемым. Кроме того, непрерывность процесса совершенствования конструкций машин приводит к повышению значимости одних факторов и снижению значимости других. Поэтому очень часто приходится формировать полезные решения в условиях информационной неопределённости – количественной, а в отдельных случаях и качественной.

В этих случаях используются экспертные методы, основная идея которых состоит в том, чтобы *использовать высокую профессиональную эрудицию и интеллект отдельных высококвалифицированных специалистов, их способность искать и находить решения слабо формализованных задач*.

Метод экспертной оценки целесообразно использовать для решения таких задач, как:

– прогнозирование перспектив развития, обоснование необходимости разработок новых систем и повышение технического уровня машин;

– определение показателей надёжности в условиях, когда применение других методов невозможно из-за отсутствия априорной информации;

– ранжирование случайных величин в порядке значимости (показателей надёжности, факторов, определяющих надёжность, и др.).

При формировании группы экспертов в нее в первую очередь *включаются специалисты данной области техники и науки, обладающие способностью к анализу и обобщениям, эрудированные в смежных областях анализируемой проблемы.*

Однако особенность интеллектуальной деятельности даже высококвалифицированных специалистов состоит в том, что она во многом зависит от внешних и внутренних условий. Поэтому при организации экспертиз повышенное внимание уделяется созданию благоприятных условий и нейтрализации факторов, неблагоприятно влияющих на работу экспертов.

Очень важную роль играют факторы психологического характера. Прежде всего, эксперты должны быть освобождены от ответственности за использование заказчиком результата экспертизы. Дело в том, что сама ответственность накладывает психологические ограничения на характер и направления выбора, а этого на стадии оценки альтернатив желательно избежать. Приходится также учитывать, что оценка, даваемая экспертом, может зависеть от межличностных отношений с другими экспертами и иногда даже от того, известна ли его оценка другим лицам. На ход экспертизы могут повлиять и личная заинтересованность эксперта, т. е. его возможная необъективность, и другие личностные качества (пассионарность или конформизм, сила воли или слабохарактерность и пр.). С другой стороны, сложность проблемы, как правило, выходит за рамки возможностей адекватной оценки одним человеком. Было бы неразумно не использовать очевидную ситуацию, когда коллективная деятельность открывает дополнительные возможности для профессионального взаимного стимулирования экспертов.

Поскольку взаимодействие между экспертами может как стимулировать, так и подавлять их деятельность, в различных ситуациях используют методики экспертиз, имеющие различные степень и характер взаимного влияния экспертов друг на друга: анонимные и открытые вопросы и анкетирование, совещания (комитеты, коллегии, комиссии, штабы), дискуссии (консилиумы, суды, ученые советы).

Одним из широко используемых приемов при организации работы экспертов является применение *«метода Делфи»*.

Основная идея этого метода состоит в том, что критика благотворно влияет на эксперта, если она ретроспективно или психологически не связана с персональной конфронтацией. Поэтому, если проводить оценку альтернатив в несколько туров, сообщая после каждого его полные итоги и сохраняя анонимность участников, эксперты склонны не только критиковать, но и прислушиваться к критике, относящейся к ним лично. Устранение психологических трудностей, связанных с персональной критикой, придает самой критике большую деловитость, объективность, она легче воспринимается. Все это приводит к тому, что обычно оказывается достаточно следующих четырёх этапов:

– раздача анкет, сбор оценок, их обобщённое представление с указанием разброса мнений;

– сообщение итогов и запрос объяснений причин индивидуального отклонения от средней или медианной оценки первой итерации;

– сообщение всех объяснений и запрос контраргументов на них;

– сообщение возражений и запрос новых оценок альтернатив, если эксперт пожелает их изменить; нахождение окончательного итога.

Вся работа проводится под руководством отдельной управляющей группы, в которую входит системный аналитик и лицо, принимающее решения; анонимность экспертов сохраняется до конца работы (а по желанию экспертов – и после её окончания). «Методика Делфи» показала на практике достаточно высокую эффективность.

Простейший вариант обработки мнений экспертов состоит в следующем. Экспертам раздают анкеты с просьбой оценить предлагаемые альтернативы. Заполненные анкеты собирают, обрабатывают и полученную информацию в некотором обобщенном виде передают лицу, принимающему решение. На практике возникает ряд вопросов, от ответа на которые зависит, какой именно способ обработки экспертных мнений следует применить в данном конкретном случае.

Предположим, например, что эксперты оценивают альтернативы в числовых шкалах. Пусть $q_j(x_i)$ – оценка i-й альтернативы j-м экспертом ($i=\overline{1,m}$, $j=\overline{1,n}$). Оценки $q_1(x_i)$, …, $q_n(x_i)$ можно рассматривать как «измерения» искомой «истинной характеристики» $q(x_i)$, считая отклонения $q_j(x_i) - q(x_i)$ случайными величинами. В качестве приближения можно использовать некоторую статистику $q(x_i) = (q_1(x_i), ..., q_n(x_i))$; обычно это выборочное среднее:

$$q(x_i)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} q_j(x_i), \qquad (5.98)$$

но можно использовать и другие статистики.

Сложнее обстоит дело, когда альтернативы нельзя оценить сразу одним числом, и экспертам предлагается дать оценки отдельно по каждому показателю. Например, оценка качества ММ складывается из оценок признаков социальных (уровень потребности), функциональных (степень соответствия назначению, технического уровня, экономических, эстетических, эргономических) и др. В этом случае имеем набор чисел $q_{jk}(x_i)$, где k – номер признака. Кроме этих чисел

экспертов просят оценить степень важности λ_{jk} каждого показателя (если это не выполнено другим способом). Тогда

$$q(x_i)=\frac{1}{n}\sum_j\sum_k \lambda_{jk} q_{jk}(x_i). \qquad (5.99)$$

Следующее уточнение вводят в случае неоднородности группы экспертов. Естественно придать различные (а не одинаковые, равные $1/n$) веса мнениям экспертов, имеющих разную квалификацию. Определение коэффициента α_j компетентности j-го эксперта можно поручить самим экспертам. Пусть каждый из них (l-й) оценивает компетентность других числами $0 \le \alpha_{lj} \le 1$ (при этом свою – числом α_{ll}).

Усреднение дает: $\alpha_j = \sum_l (\alpha_{lj} / \sum_s \alpha_{ls})$.

В результате получаем итоговую оценку:

$$q(x_i)=\sum_j\sum_k \alpha_j \lambda_{jk} q_{jk}(x_i). \qquad (5.100)$$

В тех случаях, когда эксперты лишь упорядочивают альтернативы, т.е. используют только порядковую шкалу, возможность арифметических операций отпадает. Тогда переходят к обработке либо относительных частот предпочтений данной альтернативы, либо рангов.

Более глубокие сведения о сравниваемых альтернативах можно получить, изучая «тонкую структуру» суждений экспертов. Дело в том, что оценки экспертов варьируются в пространстве критериев или упорядочены неравномерно, и чаще всего можно выделить несколько *кластеров,* т. е. плотно расположенных оценок, можно обнаружить и «выбросы», т. е. оценки, далеко отстоящие от кластеров. Значительный интерес представляет выяснение общего между близкими оценками и различий между отдаленными оценками. Это выполняют уже в ходе уточняющих опросов, в других терминах. Например, при сравнении качества промышленных изделий выяснилось, что кластеры связаны с такими отсутствовавшими в исходной анкете признаками, как различная жесткость правил приемки для различных альтернатив, технологические различия между моделями изделий и т. д. Возможен и более детальный анализ расхождений экспертов во мнениях.

Поэтому существенно более эффективным является *метод экспертной оценки*, или *метод ранговой корреляции*. Прогнозирование по этому методу производится следующим образом. Прежде всего, ставится задача прогнозирования. Например, необходимо ранжировать, т. е. расположить в ряд по значимости, факторы, определяющие

количественные значения конкретного показателя надёжности. При решении задачи прогнозирования может быть два варианта: экспертам предъявляют набор факторов и ставят задачу ранжировать эти факторы, или эксперты сами назначают факторы и их ранжируют.

Казалось бы, точность прогнозирования возрастает с увеличением численности экспертов. Однако увеличение количества экспертов приводит к избыточной информации и росту интеллектуального шума. Поэтому, как показали исследования, оптимальное число экспертов составляет 5–10.

Следующим принципиальным моментом экспертных оценок при ранжировании каких-либо явлений или процессов является оценка веса (ранга) явления в общей совокупности. Обычно ранги обозначаются порядковыми или дробными числами. Эксперт присваивает каждому фактору соответствующий ранг. Фактору, оказывающему наибольшее неблагоприятное влияние, присваивается более высокий ранг, а фактору, оказывающему наименьшее неблагоприятное влияние, – более низкий ранг.

Значения тех или иных признаков, которые можно измерить, представляют в рамках шкалы измерений случайных величин с присвоенными соответствующими рангами. Такое упорядочение не является точным способом выражения порядковых отношений ряда между экспертами и не позволяет судить, насколько близко они расположены друг к другу на шкале измерений. Однако, проигрывая в точности, процесс ранжирования выигрывает в общности подхода, так как упорядочение элементов инвариантно относительно изменения масштаба шкалы сравнения.

Для определения функции, нормирующей вес характеристик $\varphi(i)$, где i – характеристика или фактор, подлежащий нормированию, можно записать следующие условия общности:

$$\varphi(i) = 1 \text{ при } i = 1;$$

$$\varphi(i) = 0 \text{ при } i = \infty;$$

$$\lim \frac{\varphi(i+1)}{\varphi(i)} = 1 < \rho \text{ при } i \to \infty;$$

$$|\varphi(i)| > |\varphi(i+1)| \text{ при } 1 < i < \infty. \qquad (5.101)$$

Первые два условия отражают тот факт, что в ранжировании последовательности характеристик вес первой равен единице, а последней при стремлении их к бесконечности нулю. Это не исключает

возможности иметь вес нескольких характеристик, равный нулю или единице. Первые три условия определяют нормирующую функцию веса в следующем виде:

$$\varphi(i)=i/a^{i-1}. \qquad (5.102)$$

Четвёртое условие может быть выполнено подбором параметра a. Попытка его подбора приводит к $a = 2$.

Таким образом, нормирующая функция веса определяется зависимостью

$$\varphi(i)=i/2^{i-1}. \qquad (5.103)$$

В соответствии с выражением (5.103) эксперт каждому фактору присваивает ранг от 1 до 0 по убывающей степени его влияния на рассматриваемое явление. Когда такие оценки получены от экспертов, то полагают, что истинное значение исследуемой величины находится внутри диапазона оценок и что обобщенное коллективное мнение является вполне достоверным.

Оценки всех экспертов сводятся в матрицу рангов:

$$|\varphi(i,j)|=\begin{vmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1n} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{2n} \\ . & . & \cdots & . \\ \varphi_{m1} & \varphi_{m2} & \cdots & \varphi_{mn} \end{vmatrix}, \qquad (5.104)$$

где $\varphi(j,i)$ – веса или ранги факторов; j – номер эксперта ($j = 1, 2, \ldots, n$); i – номер фактора ($i = 1, 2, \ldots, m$).

Поскольку эксперты присваивают ранги в порядке убывания неблагоприятного воздействия факторов, наиболее влиятельным фактором будет тот, у которого сумма рангов наибольшая. При использовании метода экспертных оценок выделяют два основных способа обработки мнений экспертов. Один из них основан на применении стандартных приемов математической статистики. Второй способ является эвристическим. Экспертам предъявляется последовательность характеристик или факторов, которые они ранжируют путём выставления каждой i-й характеристике балла или веса $\varphi(i)$.

На основании этих данных можно установить аналитическую связь между весом характеристики и номером, который она занимает в ранжированной последовательности.

Статистическое среднее веса i-й характеристики по мнениям всех экспертов определяют по формуле

$$\overline{\varphi}(i)=\frac{\sum_{1}^{m}\varphi(j,i)}{n}, \qquad (5.105)$$

где n – число экспертов; $\varphi_{j,i}$ – вес, указанный i-м экспертом j-й характеристике; m – число оцениваемых факторов.

Относительный средний вес оценок экспертов рассчитывается по формуле

$$\varphi_0 = \frac{\overline{\varphi}(i)}{\sum_{n}\varphi(j)}. \qquad (5.106)$$

Расположение этих характеристик в ряду факторов (i) является уже достаточным для ранжирования факторов, так как расположение по величинам $\varphi(i)$ или $\varphi_0(i)$ уже указывает на распределение рангов, а следовательно, и значимости факторов.

В то же время представляет несомненный интерес выяснение вопроса о степени согласованности мнений экспертов в пределах оценки каждого фактора.

Степень согласованности экспертов оценивают статистическими и эвристическими показателями. Статистическими показателям являются дисперсия и коэффициент вариации.

По каждому оцениваемому фактору дисперсия весов экспертов определяется по формуле

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{1}^{m}[\varphi(j,i)-\overline{\varphi}(i)]^2}{m}. \qquad (5.107)$$

и коэффициент вариации i-й характеристики – по формуле

$$\nu_j=\sigma_i / \overline{\varphi}(t). \qquad (5.108)$$

Дисперсия и коэффициент вариации представляют собой косвенные показатели согласованности мнений экспертов по данному фактору. Чем меньше коэффициент вариации, тем больше согласованность во мнениях экспертов. Окончательные выводы о согласованности мнений экспертов формулируются по общей совокупности характеристик и факторов с помощью эвристических показателей.

Эвристическим показателем является *коэффициент конкордации* (согласованности), или *критерий Кендалла*, который рассчитывается по формуле

$$W = \frac{12\sum_{1}^{m} d_i}{n^2(m^2-m)-n\sum T_i}, \qquad (5.109)$$

где d_i – отклонение суммы рангов от среднего арифметического значения; $d_i = s_i - \overline{s}$ – здесь s_i – сумма рангов по i-й характеристике; $s_i = \sum \rho_i$, где ρ_i – ранг оценки веса j-й характеристики; $\overline{s} = \frac{s}{n}$; L – число групп рангов; $T_i = \sum_{1}^{L} (t_l^3 - t_l)$ – показатель связанности рангов.

Для определения коэффициента конкордации необходимо определить порядковый номер (место), который имеет данный ранг в ранжированной последовательности рангов, назначенных экспертами по всем факторам.

Если несколько экспертов указали один и тот же вес, то ранг определяется как среднее значение из соответствующих номеров.

Критерий $W = 1$ свидетельствует о полной согласованности мнений экспертов, $W = 0$ – о полной несогласованности.

Значения критерия W подчиняются χ^2-распределению.

Оценки экспертов считаются согласованными при заданном уровне доверия γ, если выполняется условие

$$\chi_T^2 = \frac{12\sum_{1}^{m} d_i}{mn(m+1) - \frac{1}{n-1}\sum T_i} > \chi_T^2(\gamma, \nu), \qquad (5.110)$$

где $\nu = n - 1$ – число степеней свободы; χ_T^2 – определяется из таблиц.

Всякий выбор основан на оценивании или сравнении альтернатив. Во многих случаях не удается выполнить такую оценку «объективно», т. е. произвести нужные измерения с помощью измерительных приборов или осуществить необходимые информативные наблюдения. Тогда прибегают к «субъективным измерениям», т. е. к экспертным оценкам. Такой способ оценивания альтернатив имеет важные особенности не только в самом процессе получения оценок,

но и в методах их обработки. Эти особенности необходимо учитывать в ходе проведения системного анализа с привлечением экспертов.

5.5. Основные методы и средства технической диагностики

Техническая диагностика – это совокупность теоретических основ, методов и средств определения технического состояния объекта. Она является неотъемлемой частью системы обеспечения надёжности технических систем, так как главной её целью являются своевременное обнаружение неработоспособного состояния. Количественно показатели надёжности оценивают вероятностными характеристиками; при этом наличие информации об их значениях в большинстве случаев не даёт возможности с высокой степенью достоверности гарантировать работоспособность объекта в назначенных условиях в течение определенного отрезка времени. Достоверность оценки работоспособности существенно возрастает с применением методов и средств технической диагностики. Такие понятия, как работоспособность, неработоспособность, отказ и другие состояния объектов, являются общими для теории надёжности и технической диагностики.

Основным объектом технической диагностики является *дефект* – каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией. Чаще всего под дефектом понимают нарушения сплошности материала, изменение его первоначальных (регламентируемых) свойств и др. Причинами возникновения дефектов являются нарушения технологии и воздействия повреждающих процессов в ходе эксплуатации объекта.

Дефекты подразделяют на *допустимые* (требованиями нормативно-технической документации (НТД)) и *недопустимые*. Допустимые в свою очередь делятся на *фиксируемые* (регистрируемые) и *нефиксируемые*. Кроме того, дефекты подразделяют на *явные, скрытые, критические, значительные и малозначительные, исправимые и неисправимые*.

Явные дефекты выявляются органолептическими методами, а *внутренние, скрытые и поверхностные* – специальными средствами. *Критическим* называется дефект, при наличии которого использование продукции по назначению невозможно. *Значительным* – дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению и/или на её долговечность, но не является критическим. *Мало-*

значительный дефект – это дефект, который несущественно влияет на функциональные возможности продукции.

По происхождению дефекты изделий подразделяются на *производственно-технологические*, возникающие при металлургическом процессе при разливке и кристаллизации или при сварке, в процессе механической или термической обработки, и *эксплуатационные*, возникающие после некоторой наработки изделия в результате протекания процессов усталости, коррозии, изнашивания, старения и эрозии, а также несоответствующего выполнения операций ТО и ремонта.

Процесс определения технического состояния объекта называется *диагностированием.* Результат диагностирования, то есть заключение о техническом состоянии, называют *диагнозом*.

В общем случае различают три типа задач по определению состояния технического объекта.

Задача генезиса (ретроспекция) заключается в определении состояния, в котором находился технический объект ранее. Правильное решение этой задачи важно при определении причин отказов объектов с целью их дальнейшего предупреждения.

Задача диагноза – определение состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени. Она решается при постановке вопроса о работоспособности, исправности и правильности функционирования объектов.

Задача прогноза состоит в предсказании состояния, в котором окажется технический объект в некоторый последующий момент времени. Такая задача часто решается при эксплуатации объектов, имеющих длительный срок службы или назначенный ресурс. При этом определяется периодичность операций ТО и ремонтов с целью предсказания показателей надёжности и недопущения перехода объекта в неработоспособное состояние.

Технический объект (система, машина, прибор, узел и т. п.) или эргатическая (человеко-машинная) система, для которых решается задача распознавания состояния, называется *объектом диагностирования (ОД)*.

В качестве ОД могут выступать любые системы, которые удовлетворяют двум условиям: могут находиться по крайней мере в двух взаимоисключающих и различимых состояниях (например, в работоспособном и неработоспособном); в них можно выделить элементы, каждый из которых также характеризуется указанными различными состояниями. Главной отличительной особенностью ОД является то,

что его состояние в целом рассматривается как функция, зависящая от состояний входящих в него элементов.

При диагностировании сложных многофункциональных систем в качестве параметра специального вида можно рассматривать возможность системы выполнять те или иные отдельно заданные функции, предусмотренные нормативно-технической документацией на объект.

Диагностические признаки делят на основные и вспомогательные. Основные характеризуют выполнение системой заданных функций, а вспомогательные – удобство эксплуатации, внешний вид и т. п. Каждому состоянию ОД соответствует определенное значение диагностического признака.

Различают шесть видов состояний ОД: *исправные и неисправные, работоспособные и неработоспособные, правильно функционирующие и неправильно функционирующие*.

Состояние объекта оценивают по *диагностическим признакам*, под которыми понимают параметры или характеристики, используемые при диагностировании. Параметр представляет собой физическую величину, а характеристика – зависимость одной физической величины от другой. Каждому состоянию объекта соответствует определенное значение диагностического признака.

В качестве примера в таблице 5.25 представлена совокупность и взаимосвязь структурных и диагностических параметров дизельного двигателя внутреннего сгорания.

Таблица 5.25 – Объекты и параметры диагностирования дизельных ДВС

Прямой (структурный) параметр	Диагностический параметр
Дизель в целом	
Эффективная мощность	Угловое ускорение коленчатого вала. Крутящий момент Снижение частоты вращения коленчатого вала при отключении цилиндров Эффективный расход топлива
Удельный расход топлива	Массовый (объёмный) расход топлива
Частота вращения коленчатого вала основного двигателя	Максимальная и минимальная частота вращения коленчатого вала (без нагрузки) Неравномерность частоты вращения

Продолжение табл. 5.25

Прямой (структурный) параметр	Диагностический параметр
Цилиндропоршневая группа	
Общий износ цилиндропоршневой группы	Количество газов, прорывающихся в картер
Герметичность камеры сгорания дизеля	Давление газов в картере
	Зазор в сопряжении гильза – поршень, определяемый по амплитуде вибросигнала
	Давление на такте сжатия
	Давление сжатого воздуха, подаваемого в цилиндр
	Неравномерность компрессии в цилиндрах дизеля
	Разрежение в надпоршневом пространстве
Кривошипно-шатунный механизм	
Зазоры между вкладышами коренных подшипников и шейками коленчатого вала	Биение коленчатого вала
Зазоры между вкладышами шатунных подшипников и шейками коленчатого вала	Свободное осевое перемещение поршня относительно шатунной шейки коленчатого вала
Зазор между втулкой верхней головки шатуна и поршневым пальцем	Параметры вибрации и шума
	Концентрация продуктов изнашивания трущихся деталей в масле
Суммарный радиальный зазор в сопряжениях кривошипно-шатунной группы	Свободное осевое перемещение поршня относительно шатуна
	Давление масла в главной магистрали
	Концентрация продуктов износа трущихся деталей
Механизм газораспределения	
Тепловой зазор в клапанном механизме	Амплитуда и фаза вибросигнала, зависимые от теплового зазора
	Тепловой зазор
Состояние кулачкового вала механизма газораспределения	Ход клапана
Общий износ механизма газораспределения	Фазы газораспределения
	Неплотность клапанов газораспределения
Система подачи топлива	
Фазы топливоподачи	Угол начала нагнетания, определяемый по импульсу давления в топливопроводе
	Угол начала нагнетания, определяемый по фазе виброимпульса
	Угол начала впрыскивания

Продолжение табл. 5.25

Прямой (структурный) параметр	Диагностический параметр
Система подачи топлива	
Равномерность подачи топлива секциями	Продолжительность подачи топлива отдельными секциями, определяемая по импульсу давления в топливопроводе
	Неравномерность продолжительности такта хода поршня, зависимая от фаз импульсов впрыскивания
Цикловая подача топлива	Площадь под кривой давления топливоподачи
	Длительность нарастания волн давления в топливопроводе
Износ прецизионных пар топливного насоса	Неравномерность угла начала нагнетания топлива, определяемая по фазам импульса впрыскивания
Давление впрыскивания	Давление начала впрыскивания топлива форсункой
	Амплитуда вибросигнала от посадки иглы на корпус распылителя форсунки
Работоспособность центробежного регулятора топливного насоса	Минимальная и максимальная частота вращения коленчатого вала
Засоренность топливных фильтров, износ перепускного клапана	Перепад давления до и после фильтра тонкой очистки топлива
Подача подкачивающего насоса топлива	Давление топлива перед фильтром тонкой очистки
Состояние обратного клапана топливного насоса	Давление топлива после фильтра тонкой очистки
Система очистки и подачи воздуха	
Засоренность воздухоочистителя	Разряжение во всасывающем коллекторе за воздухоочистителем
Герметичность впускного воздушного тракта	Максимальное разряжение во впускном тракте
Турбокомпрессор	
Зазор между валом турбины и подшипником	Давление масла в подшипнике
Упругость уплотняющих колец	Угар (изменение массы) масла
	Давление наддува
Толщина отложений на колесе турбины и экране	Момент проворачивания турбины

Продолжение табл. 5.25

Прямой (структурный) параметр	Диагностический параметр
Система смазки	
Подача масляного насоса	Приращение давления масла в главной масляной магистрали дизеля при изменении частоты вращения коленчатого вала
Общий износ деталей смазочной системы	Давление в смазочной системе дизеля
Состояние масляного радиатора	Температура масла в поддоне картера
Система охлаждения	
Охлаждающая способность системы в целом	Рабочая температура охлаждающей жидкости
Охлаждающая способность радиатора	Интенсивность нагрева охлаждающей жидкости при работе дизеля под нагрузкой

При решении конкретной задачи диагностирования исследуемый объект подвергается соответствующим испытаниям. В общем случае процесс диагностирования представляет собой многократную подачу на объект определенных входных воздействий, многократное изменение и анализ ответов (выходных сигналов или реакций) на эти воздействия, которые могут поступать на входы объекта от *средств диагностирования* (СД) или являться внешними (рабочими) сигналами, определяемыми алгоритмом функционирования объекта. Взаимодействующие между собой объекты и средства диагностирования образуют *систему диагностирования*.

Выделяют два основных вида систем диагностирования.

Система *тестового диагностирования* предусматривает подачу воздействий на ОД со стороны средства диагностирования. Других воздействий на объект диагностирования не поступает. Поэтому как состав, так и последовательность подачи этих воздействий можно выбирать исходя из условий эффективной организации процесса диагностирования. При этом каждое очередное воздействие можно назначать в зависимости от ответов объекта на предыдущие воздействия. Воздействия в такой системе называют тестовыми.

В системе *функционального (рабочего) диагностирования* средство диагностирования не формирует воздействий на ОД. На объект и средство диагностирования поступают рабочие воздействия, предусмотренные процессами функционирования объекта. Система диагностирования действует в процессе рабочего функционирования и поиска неисправностей, нарушающих нормальное функционирование.

Тестовое диагностирование. В функциональной схеме системы тестового диагностирования (рис. 5.15) блок управления (БУ) служит для хранения алгоритма диагностирования и управления работой средств диагностирования. Источник воздействий (ИВ) вырабатывает воздействие a_j в виде элементарных проверок, входящих в тест, и в соответствии с алгоритмом диагностирования в определенной последовательности подает их через устройство связи (УС) на объект диагноза (ОД), а также на модель объекта диагноза (МОД). Блок МОД вырабатывает информацию о возможных технических состояниях объекта диагностирования в виде возможных результатов b^*_J элементарных проверок, входящих в тест. Объект диагностирования в ответ на воздействие a_j формирует фактические результаты b_J элементарных проверок, которые через УС и измерительное устройство (ИУ) поступают на вход блока расшифровки результатов (БРР). В этом блоке сравниваются результаты элементарных проверок, снимаемых с выходов объекта диагностирования и формируемых МОД. Результат сравнения запоминается в БРР, после чего БУ назначает очередную элементарную проверку, входящую в тест. Если назначение очередной проверки зависит от результата предыдущей, то между блоками БРР и БУ устанавливается прямая связь.

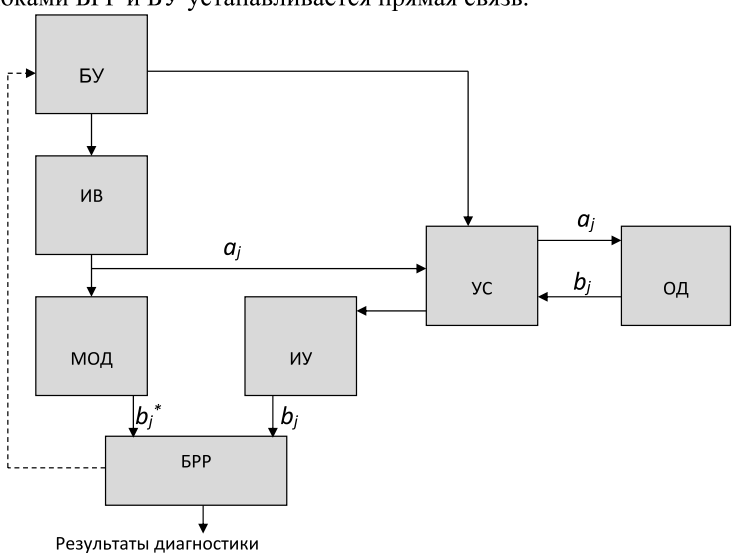


Рис. 5.15 – Типовая система тестового диагностирования

При организации тестового диагностирования основной является задача построения тестов. Для дискретных объектов можно выделить три этапа в развитии теории построения тестов.

Для первого этапа характерным является стремление получать минимальные или оптимизированные тесты на основе представления комбинированных объектов таблицами истинности, а последовательных объектов – таблицами входов и выходов. Основной моделью дефектов является класс типичных (константных) дефектов.

Второй этап построения тестов характерен переходом к структурным и структурно-аналитическим моделям дискретных объектов, разработкой новых методов обработки результатов тестирования. Таким образом, расширяется класс рассматриваемых дефектов.

Третий этап развития теории построения тестов связан с появлением больших и сверхбольших мехатронных, микропроцессорных систем и других элементов высокого уровня интеграции. Высокая размерность задач привела к необходимости функционального представления дискретных объектов и рассмотрения функциональных неисправностей взамен константных. Получает развитие вероятностный подход к построению тестов.

В настоящее время широко применяют тесты, представляющие собой квазислучайные последовательности входных воздействий. Для каждого типа последних по этой причине используются собственные математические модели и методы построения тестов.

Системы тестового диагностирования используются в те промежутки времени, когда ОД не выполняет своих основных функций. При этом решаются задачи контроля исправности и поиска дефектов. Контроль ОД в процессе функционирования возможен в те моменты, когда на входы ОД не поступают рабочие входные воздействия.

При реализации системы ***функционального*** (***рабочего***) ***диагностирования*** (рис. 5.16) рабочие воздействия a_j поступают на основные входы ОД, с которого снимаются сигналы Y_J управления средствами диагностирования и сигналы b_j ответов ОД на воздействия a_j. Сигналы Y_j управляют блоками БУ и МОД в зависимости от режима работы объекта, при этом на входы МОД поступают воздействия a_j.

Между блоками БРР и ОД устанавливается прямая связь, если ОД должен быть выключен из работы при отрицательных результатах диагностирования.

В конечном итоге процедура диагностирования сводится к сравнению работы идеального объекта (задается моделью ОД) и реально-

го исследуемого объекта. Число дефектов в реальном объекте обычно достаточно велико, поэтому процедура диагностирования сложна и требует большого числа измерительных и вычислительных операций. Для проведения процедуры диагностирования требуется решение следующих основных задач: выбор и построение модели ОД, синтез теста, построение алгоритма диагностирования, назначение средств диагностирования.

Организация контроля ОД в процессе эксплуатации во многом определяется возможными режимами его работы. При этом ОД может находиться в одном из следующих трех режимов:

– в режиме ожидания или паузы, в течение которого объект временно не исполняет рабочие функции;

– в диагностическом режиме, когда аппаратура включена и реализуются проверяющие тесты;

– в режиме основной работы, в течение которого осуществляется функциональное диагностирование при помощи встроенных схем контроля.

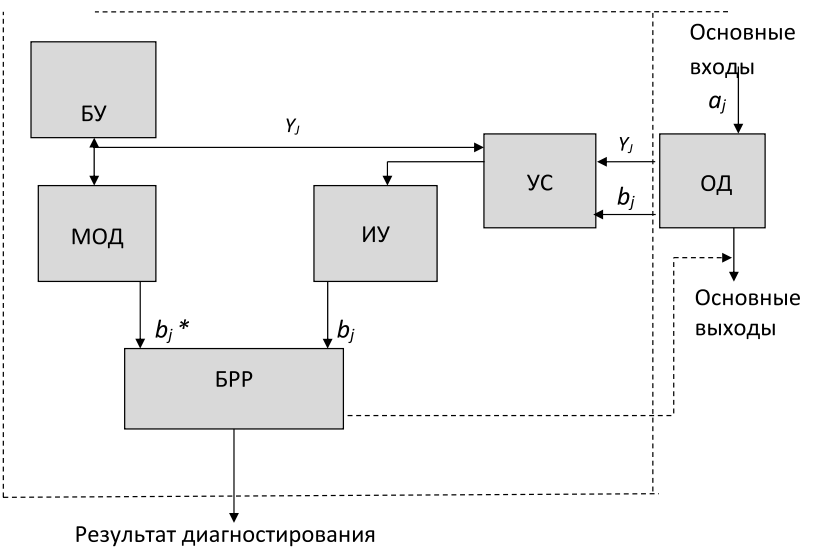


Рис. 5.16 – Схема функционального диагностирования

При диагностировании объектов на основе допускового способа контроля параметров задача построения алгоритмов диагностирования сводится к выбору составов контрольных точек. Оптимизация алгоритмов диагностирования возможна тогда, когда число элементарных проверок, достаточных для решения конкретной задачи диагностирования, меньше числа всех допустимых (практически возможных) элементарных проверок данного объекта. Для различных элементарных проверок требуются соответствующие различные затраты на их реализацию; эти проверки могут давать разную информацию о техническом состоянии объекта. Кроме того, одни и те же элементарные проверки могут быть реализованы в различной последовательности.

Поэтому для решения одной и той же задачи диагностирования (например, проверки исправности) можно построить несколько алгоритмов, различающихся либо составом элементарных проверок, либо последовательностью их реализации, либо тем и другим вместе.

Эффективность процессов диагностирования определяется не только качеством алгоритмов диагностирования, но и в не меньшей степени качеством средств диагностирования. Последние могут быть аппаратурными или программными, внешними или встроенными, ручными, автоматизированными или автоматическими, специализированными или универсальными.

Выбор или разработка средств тестового диагностирования должны осуществляться с учётом многих факторов:

– наличия необходимых СД, выпускаемых серийно;

– наличия аналогичных СД на заводе-изготовителе объекта;

– массовости выпуска объекта и его сложности;

– требуемой производительности СД и т. п.

Средства функционального диагностирования являются, как правило, встроенными и поэтому разрабатываются и создаются одновременно с объектом.

Контролепригодность объекта обеспечивается в результате адаптации его структуры к виду, удобному для диагностирования. Для этого в объект ещё на этапе его проектирования вводят дополнительные устройства – встроенные коммутаторы и адапторы для тестового диагностирования. К ним относят дополнительные контрольные точки, дополнительные входы для блокирования сигналов и задания требуемых значений сигналов, а также специальную аппаратуру, которая при диагностировании изменяет структуру объекта,

оставляя её исходной в режиме эксплуатации, генерирует тесты и анализирует результаты их реализации. Типовая схема измерительно-вычислительного диагностического комплекса (ИВДК) приведена на рисунке 5.17.

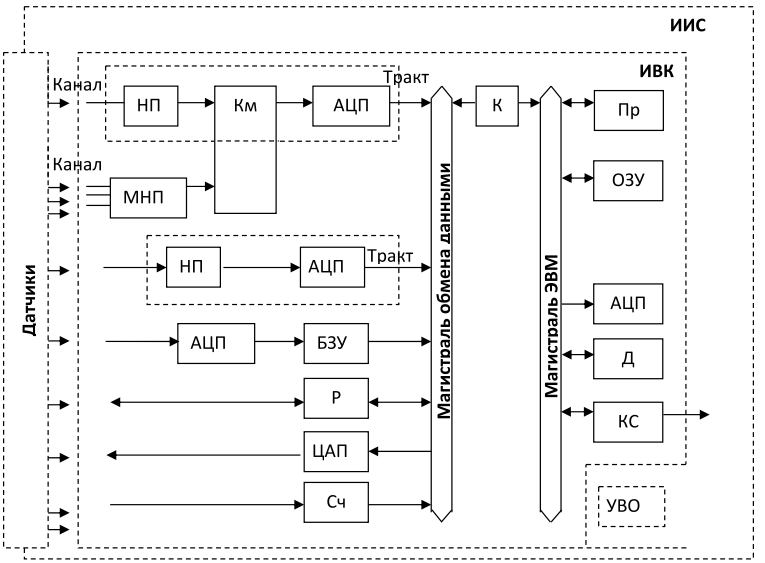


Рис. 5.17 – Структурная схема ИВДК:
НП – нормирующий преобразователь; МНП – многоканальный НП; БЗУ – буферное запоминающее устройство; Р – регистр; Сч – счётчик; Км – коммутатор; К – контроллер; Пр – процессор; Д – дисплей; КС – канал связи; УВО – устройство воздействия на объект; АЦП – аналогоцифровой преобразователь; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь.

Фиксация, распознавание и идентификация дефектов в процессе диагностирования могут осуществляться прямыми или косвенными методами в процессе разрушающего (РК) или неразрушающего (НК) контроля или их сочетания. При этом во всех случаях предпочтение отдают применению методов НК. Методы РК используют только в тех ситуациях, когда применение НК невозможно, например, при определении предела текучести стали, напряжения пробоя изоляции и др.

Основным преимуществом НК является то, что этот метод позволяет исследовать изделия на любом цикле производства, не оказывая влияния на свойства, качество и параметры изделия, то есть проверить свойства материалов и изделий без нарушения пригодности к использованию по назначению. Существующие средства НК согласно ГОСТ 4.27-81 и ГОСТ 4.28-81 предназначены для выявления дефектов типа нарушений сплошности материала изделий, контроля геометрических параметров, оценки физико-химических свойств материала изделий.

Основные физические параметры диагностирования приведены в таблице 5.26.

Таблица 5.26 – Физические параметры диагностирования

Группа параметров	Основные параметры
Кинематические	Время, скорость, ускорение, угловая скорость, угловое ускорение, период, частота периодического процесса, фаза, объёмный расход, плотность объёмного расхода, градиент скорости и др.
Геометрические	Длина, площадь, плоский угол, телесный угол, кривизна линии, кривизна поверхности, момент сопротивления плоской фигуры, осевой и полярный моменты инерции площади плоской фигуры и др.
Статические и динамические	Масса, сила, импульс силы, количество движения, давление, градиент давления, работа, энергия, мощность, коэффициент сопротивления, коэффициент упругости, момент силы, массовый расход, массовая скорость потока, затухание и др.
Механические и молекулярные	Плотность, удельный объём, удельный вес, количество вещества, относительная молекулярная масса, молярная масса, молярный объём, коэффициент продольного растяжения, модуль продольной упругости, коэффициент всестороннего сжатия, твердость, ударная вязкость, динамическая вязкость, текучесть, кинематическая вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, концентрация, коэффициент диффузии и др.
Тепловые	Температура, количество теплоты, температурный градиент, тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, энтропия, теплоемкость (объёмная и удельная), теплота фазового превращения, теплота сгорания топлива, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплопередачи, температурные коэффициенты и др.

Продолжение табл. 5.26

Группа параметров	Основные параметры
Акустические	Звуковое давление, объёмная скорость, звуковая энергия, плотность звуковой энергии, интенсивность звука, акустическое сопротивление, удельное акустическое сопротивление, механическое сопротивление, интенсивность звука, высота звука, тембр звука, громкость звука, акустический коэффициент отражения, акустический коэффициент поглощения, акустическая проницаемость перегородки, время реверберации и др.
Электрические и магнитные	Электрический заряд, поверхностная плотность заряда, напряженность электрического поля, электрическое смещение, поток электрического смещения, потенциал, электрический момент диполя, емкость, поляризованность, диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая восприимчивость, сила тока, плотность тока, электрическое сопротивление, электрическая проводимость, удельное электрическое сопротивление, удельная проводимость, магнитная индукция, магнитный поток, напряженность магнитного поля, магнитный момент, магнитодвижущая сила, магнитное сопротивление, индуктивность, взаимная индуктивность, намагниченность, магнитная проницаемость и др.
Излучений	Лучистый поток (поток излучения), поверхностная плотность мощности излучения, энергетическая освещённость, лучистая экспозиция, сила света, энергетическая яркость, энергия излучения, спектральная плотность энергии излучения по длине волны, спектральная плотность лучистой энергии, световая энергия, освещённость, яркость, световая экспозиция, относительная световая эффективность, коэффициент преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения, коэффициент пропускания и др.
Атомной физики	Момент количества движения, поляризуемость, доза поглощенного излучения, экспозиционная доза излучения, радиоактивность, коэффициент рекомбинации и др.

Методы неразрушающего контроля. НК с применением дефектоскопов основан на получении информации в виде электрических, световых, звуковых и других видов сигналов о состоянии проверяемых объектов.

В зависимости от физических явлений, положенных в его основу, НК подразделяется на виды:

– *магнитный*;
– *электрический*;
– *вихретоковый*;
– *радиоволновой*;
– *оптический*;
– *тепловой*;
– *радиационный*;
– *акустический*;
– *проникающими веществами.*

Методы каждого вида НК классифицируются по характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом, первичным информативным параметрам и способам получения первичной информации.

Магнитный неразрушающий контроль – вид НК, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом.

Электрический неразрушающий контроль – вид НК, характеризующийся величиной электрического поля и других электрических параметров взаимодействия с объектом.

Вихретоковый неразрушающий контроль – вид НК, регистрирующий взаимодействие электромагнитных полей, возникающих за счёт вихревых токов.

Радиоволновой неразрушающий контроль – вид НК, регистрирующий взаимодействие радиоволн с объектом. К данному виду контроля относят и телевизионный контроль.

Оптический неразрушающий контроль – вид НК, регистрирующий изменение характеристик оптического излучения на дефектах.

Тепловой неразрушающий контроль – вид НК, регистрирующий изменение температурных полей, вызванных дефектами.

Радиационный неразрушающий контроль – вид НК, основанный на регистрации и анализе характеристик проникающего излучения после взаимодействия с объектом.

Акустический (ультразвуковой) неразрушающий контроль – вид НК, основанный на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых в контролируемом объекте.

Неразрушающий контроль проникающими веществами – вид НК, основанный на проникновении веществ в области дефектов контролируемого объекта.

Магнитный метод НК применяют для объектов, хотя бы частично изготовленных из ферромагнитных материалов, существенно изменяющих свои свойства при воздействии магнитного поля. Для контроля параметров неферромагнитных частей объекта этот вид контроля применяется в том случае, когда происходит взаимодействие магнитного преобразователя с ферромагнитными частями объекта, а немагнитные части, находящиеся на пути магнитного потока, влияют на его величину. Степень влияния зависит от размеров немагнитных частей. В зависимости от конкретных задач используют те или иные первичные информативные параметры, определяемые по магнитным характеристикам материала объекта контроля.

К информативным параметрам в магнитном НК относятся:

– коэрцитивная сила H_c;

– намагниченность M;

– остаточная магнитная индукция B_m;

– магнитная проницаемость μ;

– параметры петли гистерезиса $B(H)$ или гармонический состав *ЭДС* индуктивного преобразователя;

– параметры магнитооптического эффекта и др.

Различают статические и динамические магнитные характеристики ферромагнетиков. К статическим относят кривую намагничивания и предельную петлю гистерезиса.

Если время установления напряженности поля соизмеримо со временем перемагничивания материала, то определяемые в этом режиме характеристики называют динамическими. Основным влияющим на положение динамических характеристик фактором, который можно учитывать при магнитном контроле, являются вихревые токи. На их положение может оказывать влияние и магнитная вязкость.

Вихревые токи создают магнитное поле, направленное навстречу внешнему полю, уменьшающему магнитную индукцию. При увеличении частоты вихревые токи возрастают и кривая намагничивания снижается. Вихревые токи вызывают тепловые потери, что приводит к расширению петли гистерезиса, как показано на рисунке 5.18.

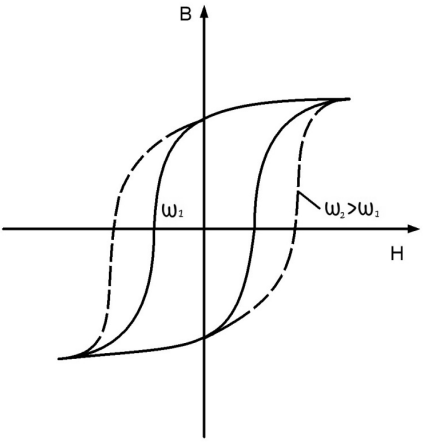


Рис. 5.18 – Влияние частоты на петлю гистерезиса

Геометрическое место вершин частных динамических петель гистерезиса образует динамическую кривую намагничивания. Отношение индукции к напряженности поля на этой кривой называют динамической магнитной проницаемостью.

По способу получения первичной информации различают следующие основные методы магнитного НК:

– магнитопорошковый;
– магнитографический;
– феррозондовый;
– гальваномагнитный;
– индукционный;
– магниторезисторный;
– магнитодом*е*нный и др.

Магнитопорошковый метод НК основан на притяжении частиц магнитного порошка к местам расположения дефектов, вызывающих рассеяние магнитного потока в намагниченной детали. Метод пригоден для деталей из ферромагнитных материалов.

Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля предназначен для выявления поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности: трещин различного происхождения, непроваров и т. д. Метод позволяет обнаруживать трещины сечением не менее

0,01×0,01 мм, расположенные на поверхности или неглубоко (до 2,5–3 мм) под поверхностью. Чувствительность значительно возрастает, если вместо сухого магнитного порошка применять магнитную суспензию.

Длину трещин отмечают непосредственно на детали или фиксируют картину отложений порошка распылением закрепляющего бесцветного раствора коллоксилина или бесцветного маловязкого быстросохнущего нитролака. Перед нанесением покрытия деталь ополаскивают бензином.

Для контроля используются специальные намагничивающие и размагничивающие устройства, работающие на постоянном, переменном или импульсном токе. С помощью указанных устройств в контролируемой детали наводится продольное, поперечное или комбинированное магнитное поле. В переменном магнитном поле сильнее намагничиваются поверхностные слои, что способствует лучшему выявлению усталостных трещин, вышедших на поверхность детали. Магнитное поле постоянного тока распределяется по всему сечению детали, в этом случае рассеяние магнитного потока вызывают внутренние трещины.

Полученное непосредственно на детали изображение (порошковый рисунок) регистрируется визуально или автоматическими приспособлениями.

Магнитопорошковый метод контроля включает технологические операции:

– подготовка к контролю;

– намагничивание объекта контроля;

– нанесение дефектоскопического материала (порошок, суспензия, магнитогуммированная паста) на объект контроля;

– осмотр и регистрация индикаторных рисунков дефектов;

– оценка результатов контроля;

– размагничивание объекта контроля.

При магнитопорошковом методе контроля применяют способ остаточной намагниченности (СОН) и способ приложенного поля (СПП).

При контроле СОН объект контроля предварительно намагничивают, а затем, после снятия намагничивающей силы, на поверхность объекта контроля наносят дефектоскопический материал. СОН применяют при контроле объектов из магнитотвердых материалов.

При контроле СПП операции намагничивания объекта контроля и нанесения суспензии выполняются одновременно.

Феррозондовый метод НК выявляет поля рассеяния, возникающие вокруг дефекта при намагничивании детали и служит для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов типа нарушений сплошности: сварных швов, волосовин, трещин, раковин, плен и др. Метод позволяет контролировать любые изделия, если их размеры и магнитные свойства позволяют намагничивание до степени, достаточной для создания магнитного поля рассеивания, обнаруживаемого над дефектом с помощью феррозондового преобразователя.

Метод основан на регистрации и количественной оценке местной неоднородности магнитного поля, появляющейся над трещиной, с помощью феррозондовых датчиков, измеряющих величину постоянного магнитного поля или его градиент. Степень неоднородности пропорциональна в определенных пределах величине площади дефекта. В первом случае вторичные катушки феррозондов с ферромагнитным стержнем включают последовательно, во втором – навстречу друг другу. Через феррозонд пропускают переменный ток высокой частоты. На выходе феррозонда появляются *ЭДС* второй гармоники.

Метод позволяет обнаруживать трещины сечением 0,01×0,01 мм, расположенные на поверхности и (что выгодно отличает этот метод от порошкового) на глубине до 30 мм. Аппаратура, более компактная по сравнению с применяемой при порошковом методе, позволяет автоматизировать процесс контроля и записи кинетики развития трещин.

Чувствительность феррозондового метода определяется совокупностью физических параметров, основными из которых являются магнитные характеристики материала контролируемого изделия, тип дефекта и его ориентация, а также условиями контроля: шероховатостью контролируемой поверхности, видом намагничивания, чувствительностью преобразователя и электронной аппаратуры, способом обработки сигнала преобразователя. Чувствительность проверяют на стандартных образцах, имеющих естественные или искусственные дефекты.

В зависимости от размеров выявляемых дефектов, а также глубины их залегания устанавливаются пять уровней чувствительности метода, указанных в таблице 5.27.

Таблица 5.27 – Уровни чувствительности феррозондового метода НК

Условные уровни чувствительности метода	Минимальные размеры дефектов, мм		Максимальная глубина залегания дефекта, мм
	ширина, мм	глубина, мм	
Поверхностные			
А	0,1	0,2	–
Б	Св. 0,1 до 0,5	Св. 0,2 до 1,0	–
Подповерхностные			
В	0,3	0,5	10,0
Г	0,3	Св. 0,5 до 1,0	10,0
Д	Св. 0,3 до 0,5	Св. 0,5 до 1,0	5,0

Характер и размеры дефекта определяются согласно методикам феррозондового контроля и инструкциям по эксплуатации дефектоскопов.

Феррозондовый метод заключается в намагничивании детали или её части и сканировании намагниченных зон детали преобразователем, сигнал от которого анализируется электронным блоком дефектоскопа. Преобразователь, размещённый над дефектоскопом, фиксирует магнитное поле рассеяния, что вызывает срабатывание индикаторов прибора.

Феррозондовые преобразователи подразделяются на полемеры и градиентомеры. *Полемер* в простейшем варианте представляет собой индуктивность (катушку) с тонким прямолинейным (обычно цилиндрическим) сердечником. Индуктивность помещается в измеряемое постоянное поле и включается в цепь источника синусоидального тока возбуждения с частотой f. Выходным эффектом является напряжение на индуктивности с частотой $2f$ (частотой второй гармоники). Это напряжение выделяется специальным фильтром второй гармоники. Причина возникновения гармоник (в том числе и второй) на индуктивности – нелинейность петли гистерезиса её сердечника. На сердечник действует переменное поле возбуждения и измеряемое постоянное магнитное поле, при этом амплитуда второй гармоники зависит от напряженности постоянного поля. Если направление поля неизвестно, ориентацию преобразователя изменяют до тех пор, пока амплитуда выходного напряжения не достигнет максимума.

Преобразователь-градиентомер состоит из двух одинаковых индуктивностей (именуемых полузондами) с параллельными сердеч-

никами, размещёнными на некотором расстоянии друг от друга. Это расстояние называется базой преобразователя. Выходное напряжение преобразователя формируется в виде разности вторых гармоник индуктивностей, и поэтому его амплитуда пропорциональна абсолютному значению разности проекций вектора Н на оси сердечников.

В зависимости от магнитных свойств материала, размеров и формы контролируемого изделия применяют два способа феррозондового НК:

– способ приложенного поля (СПП);

– способ остаточной намагниченности (СОН).

Контроль СПП заключается в намагничивании изделия и регистрации напряженности магнитных полей рассеяния дефектов преобразователем в присутствии намагничивающего поля.

Контроль СОН заключается в намагничивании изделия и регистрации напряженности магнитных полей рассеяния дефектов преобразователем после снятия намагничивающего поля.

Контроль СПП следует применять для изделий из материалов с низкими значениями коэрцитивной силы (< 1280 А/м) и остаточной индукции (< 0,53 Тл). СОН следует применять для изделий из материалов с высокими значениями коэрцитивной силы (> 1280 А/м) и остаточной индукции (> 0,53 Тл), если способ контроля не установлен в технической документации на контроль изделия, утвержденной в установленном порядке.

Электрические методы НК основаны на регистрации электрических полей и электрических параметров объекта контроля. Обычно при этом виде НК объект контроля или его часть помещают в постоянное или переменное электрическое поле, создаваемое между электродами, контактирующими с электропроводящим ОК, либо между обкладками электрического конденсатора, диэлектриком которого служит ОК. Электрическое поле в ОК может создаваться также путём электризации ОК трением. Фиксируя тем или иным способом параметры электрических полей в ОК либо параметры электрических цепей, включающих ОК или их части, можно судить о свойствах или состоянии ОК. Для регистрации используют топографию электрического поля, например изменения эквипотенциальных поверхностей или линий, либо такой электрический параметр, как разность потенциалов между двумя точками, находящимися на фиксированном расстоянии одна от другой.

В качестве регистрируемых при контроле электрических параметров ОК используют электрическое сопротивление R, электрический ток I, электрическую емкость C, относительную диэлектрическую проницаемость ε_r, тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$, контактную *термоЭДС* E_t.

Для контроля конкретных объектов выбирают один параметр или совокупность перечисленных параметров, коррелированных с контролируемыми параметрами объекта. Например, диэлектрическая проницаемость ε_r связана с соотношением компонентов гетерогенных (разнородных) сред, что позволяет определять коэффициент армирования (укрепления) композитных материалов.

В электрическом НК используют следующие методы:

– электроемкостный,
– электропотенциальный,
– электрического сопротивления,
– термоэлектрический,
– электроискровой,
– трибоэлектрический
– электростатический порошковый.

Кроме того, известен метод визуализации и фотографирования в электромагнитных полях высокой напряженности.

Все эти методы находят применение для НК как диэлектрических, так и электропроводящих объектов.

Электроёмкостный метод базируется на регистрации электрической емкости и/или тангенса угла диэлектрических потерь первичного преобразователя в виде электрического конденсатора, в состав которого входит ОК или его часть. Если ОК диэлектрический (пластик, композит, бумага и т. д.), то электрическое поле в нем создается электроемкостным преобразователем (конденсатором), обкладки которого подключают к генератору переменного напряжения. Если ОК электропроводящий или содержит диэлектрические слои на электропроводящей основе, то одной из обкладок электроемкостного преобразователя может служить сам ОК или его электропроводящая основа.

Информативные параметры электроемкостного преобразователя: электрическая емкость C и тангенс угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta_n$. С ними коррелируют различные физико-механические, геометрические свойства и параметры ОК:

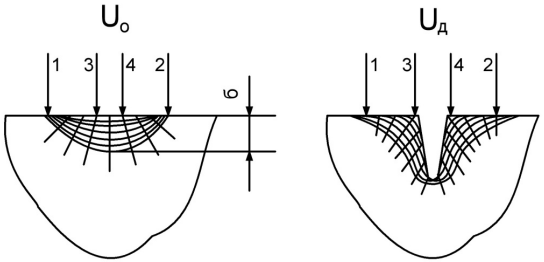
– относительная диэлектрическая проницаемость ε_r;

– размеры и форма;
– плотность;
– радиопрозрачность;
– содержание компонентов в смесях;
– влажность;
– степень полимеризации и старения полимерных материалов;
– наличие и размеры нарушений сплошности (пустот, включений);
– прочность;
– предел пластичности;
– внутренние механические напряжения и т. д.

Степень корреляции C и $\mathrm{tg}\delta_n$ с параметрами ОК различна. Так, емкость C существенно зависит от ε_r, и в то же время значения C зависят от геометрических параметров, влажности, состояния поверхности, степени полимеризации и др. Очевидно, что емкость первичного электроемкостного преобразователя зависит от состава и состояния окружающей его среды, например от давления, температуры, влажности воздуха. Значение тангенса угла диэлектричских потерь в значительной мере определяется составом и влажностью ОК, степенью полимеризации его материала, а размеры ОК и состояние его поверхности слабо влияют на этот параметр, поскольку C и $\mathrm{tg}\delta_n$ зависят от многих параметров ОК, необходимо принимать меры для выделения информации об измеряемых параметрах.

Электропотенциальный метод основан на регистрации распределения электрического потенциала по поверхности ОК, которое определяется свойствами ОК, проводящего электрический ток, создаваемый внешним источником. Метод используется главным образом для дефектоскопирования электропроводящих объектов, в частности для измерения глубины трещин.

На рисунке 5.19 показаны картины электрического поля в электропроводящей пластине при отсутствии и наличии в ней трещины. С помощью электродов 1, 2, называемых токовыми и установленных по разные стороны трещины, глубину которой необходимо промерить, к пластине подводится электрический ток. Вектор плотности тока J в пластине определяется вектором напряжённости электрического поля E и совпадает с ним по направлению: $J = \sigma * E$, где σ – удельная электрическая проводимость материала ОК.



а *б*

Рис. 5.19 – Картины поля в электропроводящем ОК при сильном скин-эффекте при отсутствии и наличии трещины

Распределение плотности тока в ОК можно найти, решив краевую задачу, описываемую уравнениями Максвелла и граничными условиями. При необходимости можно использовать методы физического и численные методы математического моделирования. Из сопоставления картин поля рисунка 5.18*а*, *б* следует, что трещина в сплошной проводящей среде, ориентированная поперек изолиний плотности тока, вызывает искажение изолиний плотности тока и эквипотенциалов. Это можно обнаружить, измеряя разность потенциалов между двумя точками на поверхности с помощью потенциальных электродов *3* и *4*, расстояние между которыми фиксировано. Очевидно, что степень искажения эквипотенциалов зависит от глубины трещины *h,* поэтому разность потенциалов U между потенциальными электродами определяется значением h. Разность потенциалов U зависит также от ширины трещины, тока источника, удельной электрической проводимости σ материала и геометрических параметров ОК. Влияние ширины трещины проявляется при отношении её ширины к глубине, большем 0,1. На практике это отношение меньше 0,1, поэтому влиянием изменения ширины трещины можно пренебречь. Если контроль осуществляется на переменном токе, то разность потенциалов зависит также от круговой частоты ω тока и абсолютной магнитной проницаемости μ_a материала ОК вследствие скин-эффекта (скин – слой). Последний проявляется в уменьшении глубины проникновения δ электромагнитного поля в ОК с повышением частоты ω. Это позволяет исключить влияние толщины ОК на показания прибора, так как контуры тока сосредоточиваются в поверхностном слое.

Если глубина h трещины мала по сравнению с расстоянием между токовыми электродами, то зависимость напряжения U_∂ от h линейна. На практике измеряют разность $U_\partial - U_0$ напряжений, где U_∂ и U_0 – напряжения между потенциальными электродами при наличии между ними трещины и без нее.

Чтобы исключить влияние тока и удельной электрической проводимости ОК на информативный параметр, целесообразно ввести относительную разность напряжений:

$$U^* = (U_\partial - U_0)/U_0. \qquad (5.111)$$

Тогда глубину трещины можно определить по приближенной формуле

$$h = \frac{\Delta}{2} U, \qquad (5.112)$$

где Δ – расстояние между потенциальными электродами.

Электропотенциальные дефектоскопы применяют для измерения глубины трещин, обнаруженных магнитопорошковыми, вихретоковыми и другими средствами НК, имеющими низкие пороги чувствительности, но не позволяющими достоверно судить о глубине дефектов. Другая важная область применения – количественное изучение процесса роста трещин при проведении статических прочностных, усталостных и других видах испытаний материалов и изделий.

Метод электрического сопротивления основан на регистрации значения электрического сопротивления участка ОК. Этот метод по физическим основам близок электропотенциальному.

Приборы, основанные на методе электрического сопротивления, применяют для измерения толщины электропроводящих покрытий на изоляционных основаниях, в частности для измерения толщины медных проводников на печатных платах – основных конструктивных элементах радиоэлектронных и электронных вычислительных средств. Одна из главных проблем при этом состоит в исключении влияния переходных сопротивлений электрических контактов, соизмеримых с сопротивлениями ОК, на результаты измерений.

Метод электрического сопротивления успешно применяется для установления факта наличия или отсутствия трещин, пустот и инородных включений в локальных объёмах ОК. Применение основано на различных значениях проводимостей металла ОК и локальных нарушений сплошности.

Термоэлектрический метод основан на регистрации термоэлектродвижущей силы, возникающей при контакте разнородных проводников, один из которых ОК.

Известно, что при контакте проводников разного химического состава в тонком контактном слое возникает электродвижущая сила, называемая контактной. Если из разнородных проводников составить замкнутую цепь, то ток в ней определяется суммой контактных *ЭДС*. В цепи, составленной из проводников первого класса, к которым относятся металлы и сплавы, алгебраическая сумма контактных *ЭДС* равна нулю, если участки цепи имеют одинаковую температуру. Если же контакты разнородных проводников имеют различную температуру, то возникающая в цепи *ЭДС*, называемая термоэлектрической, создает ток. Это явление называют термоэлектрическим, или *эффектом Зеебека*. ТермоЭДС определяется по формуле

$$E_t = \alpha\,(t_г - t_x), \tag{5.113}$$

где α – коэффициент термоЭДС, зависящий от химического состава пары контактирующих проводников; $t_г$ – температура нагретого («горячего») контакта; t_x – температура ненагретого («холодного») контакта.

При контроле термоэлектрическим методом применяют две основные схемы: абсолютную и дифференциальную. Горячий электрод (обычно медный) нагревается, например, с помощью индукционного подогревателя и размещается в термоизолированном корпусе. В этом же корпусе находится датчик температуры (терморезистор), с помощью которого регулируется ток подогревателя так, чтобы разность температур горячего и холодного электродов была постоянной. При использовании абсолютной схемы (рис. 5.20*а*) измеряется абсолютное значение термоЭДС E_t, и по нему с помощью справочных таблиц определяется марка материала объекта контроля. Дифференциальная схема (рис. 5.20*б*) позволяет сравнивать объект контроля *1* с контрольным образцом *2*, выполненным из заданного материала, путём измерения термоЭДС пар электрод – ОК и электрод – контрольный образец. При совпадении химического состава материалов ОК и контрольного образца $\Delta E_t = 0$.

Очевидно, что термоэлектрические приборы можно применять только для контроля металлических объектов, не имеющих изоляционных, лаковых, красочных, эмалевых и других покрытий.

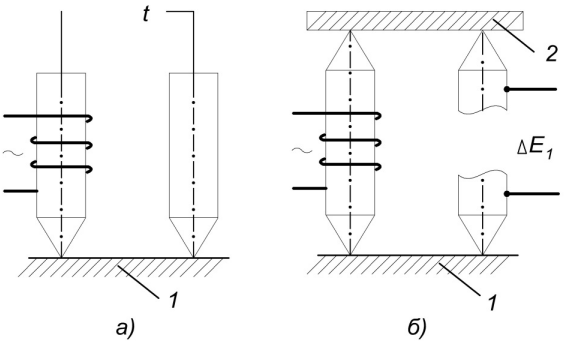


Рис. 5.20 – Абсолютная (*а*) и дифференциальная (*б*) схемы термоэлектрического контроля

Электроискровой метод НК основан на регистрации электрического пробоя на участке поверхности объекта контроля. Он используется для обнаружения нарушений сплошности диэлектрических защитных покрытий на электропроводящих объектах, а также для обнаружения трещин в диэлектрических объектах. Если в диэлектрике, к которому приложено напряжение, имеются газовые пузыри, поры, трещины, то в этом месте возникает искровой пробой.

Искровому разряду предшествует коронный разряд, который возникает вследствие значительной неоднородности электрического поля в разрядном промежутке. При этом ионизация возникает лишь в тонком слое вблизи концов электродов с малым радиусом кривизны.

Электроискровой дефектоскоп содержит источник регулируемого высокого напряжения, электронный блок, набор электродов и вспомогательных устройств. Электронный блок служит для регулировки и индикации испытательного напряжения, счёта числа пробоев, световой и звуковой сигнализации о пробое. Возникновение искрового пробоя регистрируется электронными устройствами дефектоскопа по изменению электрического режима цепи, в которой происходит пробой.

Трибоэлектрический метод НК основан на регистрации электрических зарядов, возникающих в ОК при трении двух тел из разнородных материалов. Оба трущихся тела электризуются под действием контактной разности потенциалов, причем приобретаемые ими заря-

ды равны по абсолютному значению и противоположны по знаку. При трении двух диэлектриков положительно заряжается тот, у которого больше диэлектрическая проницаемость. При трении диэлектрика о металл диэлектрик приобретает положительный заряд. Измеряя заряд, полученный объектами контроля при трении об одно и то же тело, можно сортировать объекты.

Другое приложение трибоэлектрического эффекта относится к дефектоскопии. Если предварительно наэлектризованный диэлектрический порошок нанести на поверхность диэлектрического ОК, то последний приобретает электростатический заряд противоположного знака. Электростатическое поле на поверхности ОК искажается при наличии неоднородностей, например трещин, на краях которых создаются электростатические поля рассеяния. В результате порошок оседает на краях трещин, делая их хорошо различимыми. Этот способ индикации дефектов называют электростатическим порошковым и применяют для обнаружения трещин в изделиях и покрытиях из диэлектрических материалов.

Электрографический метод НК основан на применении электрохимических процессов и используется для обнаружения пор и трещин в металлических покрытиях на плоских металлических основаниях. Принцип действия приборов, использующих этот метод, состоит в том, что к поверхности ОК плоским электродом прижимают реактивную бумагу, пропитанную электролитом, и пропускают постоянный ток между электродом (анодом) и испытуемой поверхностью. В результате электрохимических процессов переносов ионов металла основы к аноду в тех местах, где сплошность покрытия ОК нарушена, бумага изменяет свой цвет и на ней образуется рисунок дефектов покрытия. Такие приборы используются для обнаружения дефектов в покрытиях из золота, платины, родия, палладия, нанесенных на медь, никель, серебро, а также в покрытиях из никеля, цинка, кадмия, олова на стали, в покрытиях из серебра на латуни или олове, из хрома на никеле. Они находят применение, например, при контроле печатных плат и других плоских объектов.

Метод высокочастотной фотографии основан на эффекте Кирлиана, называемого методом высокочастотной фотографии или методом визуализации и фотографирования в электромагнитных полях высокой напряженности. В основе метода получения фотоизображений объектов, помещённых в высокочастотное электрическое поле, лежат фотохимические процессы. Если фоточувствительный

слой наложить на электропроводящий или диэлектрический объект и поместить его между электродами, к которым приложено переменное напряжение, то в фоточувствительном слое появляется скрытое изображение объекта, которое после проявления становится видимым. При этом зоны неоднородности ОК отображаются почернением фотослоя.

Применением данного способа НК осуществляется контроль качества металлических объектов. Неоднородности поверхности металла (трещины, включения) приводят к перераспределению электрического поля на поверхности, что выявляется после проявления фотослоя. При этом размеры мелких неоднородностей (узких трещин, проколов) увеличиваются в десятки и сотни раз. Фотоизображение может также отображать внутреннюю структуру металлов и сплавов.

Вихретоковый метод НК предназначен для выявления поверхностных дефектов типа волосовин, усталостных и наклепочных трещин на деталях из электропроводящих материалов.

Принцип действия вихретоковых дефектоскопов основан на возбуждении в ОК вихревых токов с помощью вихретокового преобразователя. В качестве преобразователя обычно используются индуктивные катушки, по которым пропускается переменный или импульсный ток, создающий вокруг катушки электромагнитное поле. При установке преобразователя на металлическую поверхность магнитное поле катушки вызывает в поверхностном слое металла вихревые токи в виде концентрических окружностей, максимальный диаметр которых примерно равен диаметру катушки. Вихревые токи создают собственное (вторичное) магнитное поле, которое воздействует на параметры преобразователя. По характеру этого воздействия можно судить о состоянии поверхностного слоя контролируемой детали, в том числе о наличии трещины.

Параметры вихревых токов зависят от многих факторов, в том числе от электромагнитных свойств поверхностного слоя контролируемого материала, частоты и формы возбуждающего тока. Вихревые токи возбуждаются непосредственно под вихретоковым преобразователем, установленным на контролируемую поверхность, и проникают на глубину от долей миллиметра до нескольких миллиметров в зависимости от частоты возбуждающего тока. Чем выше частота, тем меньше глубина проникновения вихревых токов.

Вихретоковые дефектоскопы различаются по типу преобразователя, частоте и виду возбуждающего тока, способу обработки сигнала, поступившего от преобразователя.

Как и феррозондовый метод НК, вихретоковый метод обеспечивает выявление поверхностных и подповерхностных дефектов сканированием датчика по поверхности изделия. Особенностями контроля состояния вихретоковым методом следует считать выбор преобразователя по диаметру в зависимости от зоны контроля. При этом толщина неметаллического покрытия изделия не должна превышать 2 мм.

Особенности применения вихретоковых дефектоскопов дополнительно связаны с помехами в виде шероховатости поверхностей ОК. Максимальная величина шероховатости не должна превышать значений R_z 80–100.

Радиоволновой метод НК основан на регистрации изменения параметров электромагнитных колебаний СВЧ, взаимодействующих с ОК. Диапазон длин волн, преимущественно используемый в радиоволновом контроле, ограничен 1–100 мм. Радиоволновой контроль применяют для решения всех типовых задач НК: толщинометрии, дефектоскопии, структуроскопии и интроскопии (контроля внутреннего строения ОК). Используемая при этом аппаратура, как правило, построена на базе стандартных или модернизированных элементов СВЧ. Специальным элементом при решении конкретной задачи может быть источник или приемник излучения, а также приспособление для крепления и перемещения ОК.

Среди других особенностей радиоволнового контроля следует отметить использование импедансного метода для расчёта параметров сигналов и соизмеримость длины волны излучения с размерами радиоволнового тракта «источник излучения – объект контроля – приемник излучения». При этом канал распространения колебаний СВЧ (двухпроводные линии, волноводы, свободное пространство) характеризуют:

– волновым сопротивлением z или комплексным волновым сопротивлением z_c;

– тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$;

– коэффициентом стоячей волны по напряжению;

– коэффициентом бегущей волны по напряжению.

При переходе электромагнитной волны из одной среды в другую по нормали к граничной поверхности формируется отраженная волна.

Дефект в виде расслоения заменяется в модели плоскопараллельным слоем такой же толщины, как дефект. Амплитуда сигнала от дефекта уменьшается пропорционально площади, занимаемой дефектом относительно площади контролируемой зоны.

Соизмеримость длины волны излучения СВЧ с размерами элементов радиоволнового тракта обусловливает сложный характер электромагнитного поля в системе контроля. По этой причине методика оценки сигналов в системе имеет характерную особенность. Если расстояние между границами различных однородных сред, составляющих ОК, превышает длину волны в материале, компоненты электромагнитной волны оценивают на основе законов геометрической оптики.

В противном случае предпочтительнее применение импедансного метода.

В обоих случаях оценки сигналов в системе приближенные и не исключено появление больших ошибок. Поэтому рекомендуется пользоваться расчётным методом для определения относительных значений величин – изменения амплитуд сигналов при малых изменениях параметров ОК или условий контроля. Что касается абсолютных значений сигналов, их следует оценивать экспериментально.

Если контролируемая величина непосредственно связана с напряженностью поля (мощностью) отраженного, прошедшего или рассеянного излучения, используется *амплитудный метод* контроля. Техническая реализация метода проста, однако невысокая помехоустойчивость ограничивает его применение. Более надёжные результаты получают, используя *фазовый* и *амплитудно-фазовый* методы, основанные на выделении полезной информации, заключенной в изменениях амплитуды и фазы волны. Для выделения этой информации в аппаратуру контроля вводят опорное плечо «источник – приемник излучения» и схему сравнения сигналов от ОК с опорным.

Если толщина ОК превышает длину волны используемого зондирующего излучения, рекомендуется для её измерения использовать *геометрический* или *временной* метод. В первом случае контролируемый параметр связан с отклонением положений отраженного луча в плоскости регистрации относительно выбранной системы координат, во втором – с изменением задержки сигнала во времени.

Для контроля тонкопленочных и анизотропных материалов применяют *поляризационный* метод, основанный на анализе изменений плоскости или вида поляризации колебаний после взаимодей-

ствий излучения с ОК. Сигналы от испытываемых ОК характеризуют степень отклонения их свойств от образцового.

Голографический метод НК дает хорошие результаты при контроле внутреннего строения ОК, однако из-за сложности его аппаратурной реализации метод имеет ограниченное применение.

Радиоволновой контроль по прошедшему излучению позволяет обнаружить дефекты ОК, если их параметры абсолютной магнитной и электрической проницаемости μ_a и ε_a значительно отличаются от аналогичных параметров основного материала, а размеры соизмеримы или превышают длину волны фондирующего излучения. В простейшем варианте такого контроля в приемном тракте поддерживают режим бегущей волны. Наиболее полную информацию об ОК дает применение многоэлементных антенн, поскольку в этом случае удается воспроизвести внутреннюю структуру объекта. Для повышения разрешающей способности дефектоскопии используют метод самосравнения. Он реализуется с помощью двух комплектов излучающих и приемных устройств, максимально приближенных друг к другу. Результирующий сигнал определяется разностью амплитуд и фаз сигналов приемников каждого канала. Наличие дефекта приводит к изменению условий распространения волны в одном канале и появлению разностного сигнала.

Анализ динамики изменения сигнала при периодическом прохождении дефекта через зону контроля радиоволнового дефектоскопа позволяет снизить порог его чувствительности.

Резонансный метод радиоволнового контроля основан на введении ОК в резонатор, волновод или длинную линию и регистрации изменений параметров электромагнитной системы (резонансной частоты, добротности, возбуждаемых типов колебаний и т. д.). Этим методом контролируются размеры, электромагнитные свойства, деформации и другие параметры ОК. Успешно используется резонансный метод для контроля уровня жидкостей в резервуарах и параметров движения различных объектов.

Радиоволновые средства НК – это датчики с чувствительным элементом, в котором контролируемая величина преобразуется в информативный параметр; СВЧ-генераторы электромагнитных колебаний; вторичные преобразователи, предназначенные для формирования сигналов регистрации и управления.

Оптический метод НК основан на наблюдении или регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с ОК.

По характеру взаимодействия различают методы *прошедшего, отраженного, рассеянного* и *индуцированного излучения*. Последним термином определяют оптические излучения объекта под влиянием внешнего воздействия, например люминесценцию. Первичными информативными параметрами служит амплитуда, фаза, степень поляризации, частота или частотный спектр, время прохождения света через объект, геометрия преломления и отражения лучей.

Оптические методы имеют очень широкое применение благодаря большому разнообразию способов получения первичной информации. Возможность их применения для наружного контроля не зависит от материала объекта. Самым простым методом является органолептический визуальный контроль, с помощью которого определяют видимые дефекты, отклонения от заданных формы, цвета и т. д. Применение инструментов (визуально-оптический контроль) типа луп, микроскопов, эндоскопов для осмотра внутренних полостей, проекционных устройств для контроля формы изделий, спроектированных в увеличенном виде на экран, значительно расширяет возможности этого метода. Использование интерференции позволяет с точностью до 0,1 длины волны контролировать сферичность, плоскостность, шероховатость, толщину изделий. Дифракцию применяют для контроля диаметров тонких волокон, толщины лент, форм острых кромок.

Оптические методы широко применяют для контроля прозрачных объектов. В них обнаруживают макро- и микродефекты, структурные неоднородности, внутренние напряжения (по вращению плоскости поляризации). Использование гибких световодов, лазеров, оптической голографии, телевизионной техники существенно расширило область применения оптических методов, повысило точность измерения.

В результате взаимодействия оптического излучения с веществом изменяются пространственно-временные распределения амплитуды, фазы, поляризации, степени когерентности волн. Изменения проявляются в интерференции, дифракции, преломлении, отражении, рассеянии, дисперсии волн. Возможны изменения характеристик ОК – механооптических, магнитооптических, акустооптических, фотопроводимости и др. Благодаря большому объёму информации об ОК, переносимой оптическим излучением, возможно решить широкий спектр практических задач. К их числу относятся задачи контроля геометрических параметров продукции, состава вещества.

Отдельные области применения – обнаружение дефектов на поверхности непрозрачных и внутри прозрачных ОК: контроль качества внутренних поверхностей трубопроводов, обнаружение инородных включений в оптически прозрачных изделиях и т. д.

Тепловые методы НК позволяют получить дополнительную информацию об ОК, которая так же переносится оптическими излучениями. С их помощью контролируются качество сборки электронных узлов, надёжность контактов высоковольтных линий передачи, правильность сборки электродвигателей, параметры и дефекты в непрозрачных для оптического излучения ОК и т. д.

Тепловой НК основан на регистрации изменений тепловых или температурных полей ОК. Он применим к объектам из любых материалов. По характеру взаимодействия поля с ОК различают методы: *пассивный* или *собственного излучения* (при этом на объект не воздействуют внешним источником энергии) и *активный* (объект нагревают или охлаждают от внешнего источника). Диагностическим параметром является температура или тепловой поток.

При контроле пассивным методом измеряют тепловые потоки или температурные поля объектов с целью определения неисправностей, проявляющихся в виде мест повышенного нагрева. Таким образом выявляют правильность функционирования систем охлаждения ДВС, места утечки теплоты в зданиях, участки электрических и электронных цепей с повышенным нагревом, находят трещины в двигателях и т. д.

При контроле активным методом объект обычно нагревают и измеряют температуру или тепловой поток с одной из сторон объекта. Это позволяет обнаруживать несплошности (трещины, пористость, инородные включения) в объектах, изменения в структуре и физико-химических свойствах материалов по изменению теплопроводности, теплоемкости, коэффициенту теплоотдачи. Таким способом выявляют участки с недостаточной теплопроводностью многослойных материалов. Неплотное взаимное прилегание слоев и внутренние дефекты обнаруживают как участки повышенного или пониженного нагрева поверхности ОК. Измерения температур или тепловых потоков выполняют контактным или бесконтактным способом. В последнем случае передача теплоты происходит в основном в связи с излучением электромагнитных волн в инфракрасной или видимой части спектра в зависимости от температуры тела. Наиболее эффективным средством бесконтактного наблюдения, регистрации темпе-

ратурных полей и тепловых потоков является сканирующий тепловизор.

Тепловые методы НК уступают оптическим по номенклатуре решаемых задач и точности получаемых результатов. Область их применения ограничена контролем размеров объектов, помещённых в непрозрачные для оптического излучения среды, и используемые при этом технические средства подобны оптико-электронным. Различают свыше 30 типов источников оптического и теплового излучения. По способу генерирования они подразделяются на температурные, люминесцентные и лазерные.

Радиационный метод НК основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с ОК. В зависимости от природы ионизирующего излучения радиационный метод НК подразделяют на виды: рентгеновский, гамма- и бета-излучений, нейтронный. В последнее время находят применение потоки позитронов, по степени поглощения которых определяют участки объекта, обедненные или обогащенные электронами.

Наиболее широко используют для контроля рентгеновское и гамма-излучения. Их можно использовать для контроля объектов из самых различных материалов, подбирая благоприятный частотный диапазон излучения.

Все рассмотренные ранее виды контроля основаны на применении электромагнитного излучения. Частота колебаний повышалась от метода к методу. При контроле магнитными и электрическими методами использовались постоянные или медленно изменяющиеся поля. В вихретоковом контроле частоты достигали мегагерцевого диапазона. Далее частота увеличивалась при использовании СВЧ, инфракрасного, оптического излучения. Рентгеновское и гамма-излучения являются наиболее коротковолновыми из всех рассмотренных ранее.

По характеру взаимодействия с ОК основной способ радиационного контроля – метод прохождения. Он основан на существенно различном поглощении излучения материалом объекта и дефектом. Таким образом, информативный параметр здесь – плотность потока излучения: в местах дефектов плотность прошедшего потока возрастает. Чем больше толщина ОК, тем более высокочастотное (более жесткое) излучение применяют для контроля. Предельное значение толщины ОК из стали, контролируемой с помощью радиационного излучения, – около 600 мм. Приёмником излучения служат: рентгеноплёнка (радиографический метод), сканирующий сцинтилляцион-

ный счётчик частиц и фотонов (радиометрический метод], флуоресцирующий экран с последующим преобразованием изображения в телевизионное (радиоскопический метод) и т. д. Перспективным направлением развития радиационного НК является томография, а наиболее применяемым в настоящее время методом радиационного НК является рентгеноскопия.

С помощью рентгеновских аппаратов можно осуществлять контроль изделий из сталей и сплавов, толщина которых не превышает 300 мм.

Существуют различные устройства для рентгеноскопии материалов (рис. 5.21, соответственно поз. 1–7): обычное просвечивание с выходом на флюоресцирующий экран; просвечивание с использованием электролюминесцентного экрана (яркость повышается в 30–100 раз при одновременном повышении чувствительности); просвечивание в комбинации с использованием электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и усилителей; наблюдение рентгеновского изображения с обычного флюоресцирующего экрана на кинескопе телевизора (эта схема допускает применение излучений с большой энергией), вместо экрана используются люминофоры, создаются условия для различной защиты от излучения; устройство, позволяющее превращать изображение в видеосигналы и передавать их на телевизионный экран; устройство со специальной рентгеновской трубкой, у которой с помощью отклоняющей магнитной катушки катодный луч обегает анод и развертывает рентгеновский луч по ОК синхронно с разверткой луча на телевизионном экране. Приемный экран измеряет интенсивность развертывающего рентгеновского луча за объектом и передает видеосигналы на дисплей ПЭВМ или экран телевизора.

Акустический метод НК. Основная область частот акустического метода НК находится в ультразвуковом диапазоне. Применение методов ультразвукового контроля (УЗК) рекомендуется для диагностирования сплошных сред, стыковых, угловых, нахлёсточных и тавровых соединений, выполненных дуговой, электрошлаковой, газовой, газопрессовой, электронно-лучевой, стыковой сваркой, для выявления дефектов типа трещин, непроваров, пор, шлаковых включений и т. п. Необходимость и условия проведения УЗК, объём контроля, размеры недопустимых дефектов и другие особенности контроля устанавливаются в нормативно-технической документации на изделия.

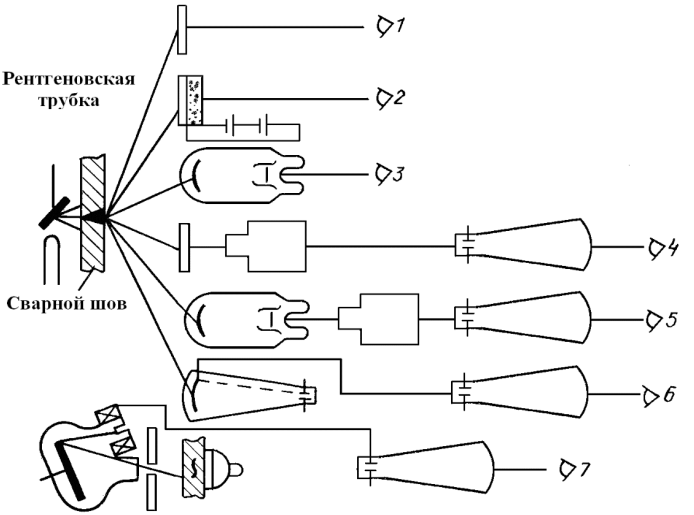


Рис. 5.21 – Схемы различных методов рентгеноскопии

В аппаратурные комплексы, которые используются для УЗК, входят:

– ультразвуковые дефектоскопы;

– стандартные образцы для настройки дефектоскопа;

– вспомогательные приспособления.

Дефектоскопы и стандартные образцы, используемые для контроля, должны быть проверены и аттестованы в установленном порядке. Для УЗК используются дефектоскопы, укомплектованные прямыми (нормальными) и наклонными пьезоэлектрическими преобразователями с различным углом ввода ультразвукового луча, работающие в области частот более 0,16 МГц.

Основными измеряемыми характеристиками выявленного дефекта являются:

– эквивалентная площадь дефекта или амплитуда эхосигнала от дефекта с учётом расстояния до него;

– координаты дефекта;

– условный размер дефекта;

– условное расстояние между дефектами;

– количество дефектов на единицу длины.

Эквивалентная площадь дефекта определяется по амплитуде эхо-сигнала путём сравнения её с амплитудой эхо-сигнала от искусственного дефекта в образце или путём использования расчётных диаграмм.

Условными размерами выявленного дефекта являются:

– условная протяженность *L*;

– условная ширина *X*;

– условная высота *H*.

Существуют разные типы акустических волн, отличающиеся скоростью распространения, направлением колебания частиц и другими признаками. Их называют модами (от *лат*. modus – образец, способ).

При неразрушающем контроле акустические волны возбуждают и принимают путём преобразования электрических колебаний в упругие и наоборот. Для этой цели используют специальные устройства – электроакустические преобразователи (ЭАП). Преобразователь, предназначенный для излучения волн, называют *излучателем*, предназначенный для приема – *приемником*. Если один и тот же преобразователь выполняет обе функции, то его и соответствующую схему контроля называют совмещёнными. Если излучатель и приемник разделены, то схему контроля называют раздельной. Если раздельные излучатель и приемник объединены конструктивно в одном блоке, то преобразователь называют раздельно-совмещённым.

Для передачи колебаний от преобразователя с чувствительным элементом к ОК используют различные способы акустического контакта. Обычно промежуток между преобразователем и ОК заполняют жидкостью. Если толщина слоя жидкости меньше половины длины акустической волны, то говорят о контактном способе, а если больше нескольких длин волн – об иммерсионном.

Для получения информации обо всем ОК преобразователь обычно перемещают по его поверхности. Этот процесс называют сканированием (*англ*. scan – рассматривать, разглядывать). Поверхность ОК, через которую вводят акустические волны, называют поверхностью ввода.

Методы акустического контроля подразделяют на две укрупнённые группы: *активные*, использующие излучение и прием акустических колебаний и волн, и *пассивные*, основанные только на приеме колебаний и волн. В каждой группе выделяют методы, основанные на возникновении в объекте контроля бегущих и стоячих волн (или ко-

лебаний), объекта в целом или его части. На рисунке 5.21 приведена классификация методов УЗК, применяемых в практике неразрушающего контроля. Рассмотрим наиболее распространенные методы.

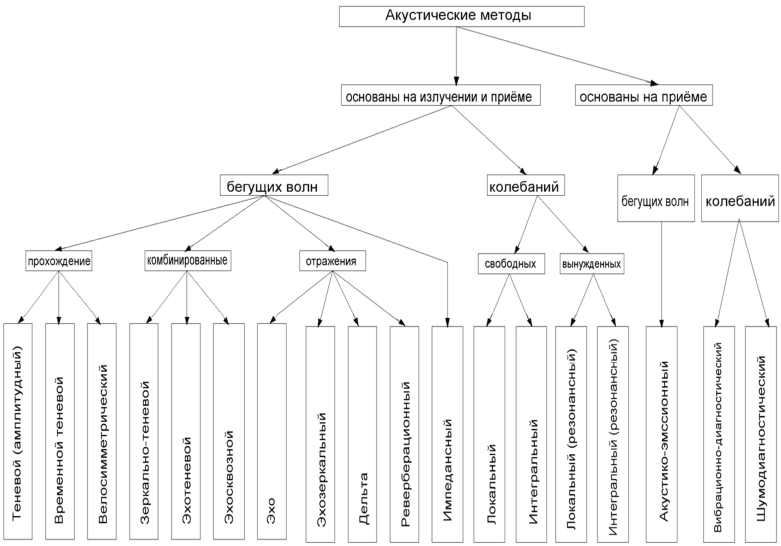


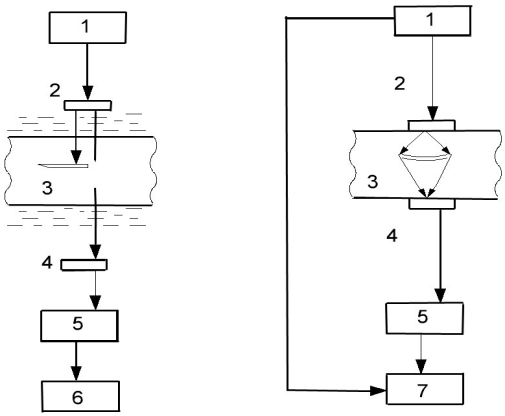
Рис. 5.22 – Классификация акустических методов НК

Активные методы, в которых применяют бегущие волны, делят на подгруппы: методы, использующие прохождение, отражение волн, и комбинированные методы, в которых применяют как отражение, так и прохождение.

Методы прохождения предполагают наличие двух преобразователей – излучающего и приемного, расположенных по разные стороны ОК или контролируемого участка. К этой подгруппе относят следующие методы дефектоскопии:

– *теневой* (*амплитудно-теневой*) метод, основанный на регистрации уменьшения амплитуды прошедшей волны (так называемого сквозного сигнала) под влиянием дефекта (рис. 5.23*а*). Применяют как импульсное, так и непрерывное излучение;

– *временной теневой* метод, основанный на измерении запаздывания импульсов, вызванного огибанием дефекта (рис. 5.23*б*).



а *б*

Рис. 5.23 – Методы прохождения:
а – теневой; *б* – временной теневой; *1* – генератор, *2* – излучатель, *3* – объект контроля, *4* – приемник, *5* – усилитель, *6* – измеритель амплитуды, *7* – измеритель времени пробега.

В *методах отражения* используют как один, так и два преобразователя; применяют, как правило, импульсное излучение. К этой подгруппе относят следующие методы дефектоскопии:

– *эхометод* (рис. 5.24*а*) основан на регистрации эхосигналов от дефектов. На экране индикатора обычно наблюдают посланный (зондирующий) импульс I, импульс III, отраженный от противоположной поверхности (дна) ОК (донный сигнал), и эхосигнал от дефекта II. Время прихода импульсов II и III пропорционально глубине залегания дефекта и толщине ОК;

– *эхозеркальный метод*, в котором анализируют сигналы, испытавшие зеркальное отражение от донной поверхности ОК и дефекта, т. е. прошедшие путь ABCD (рис. 5.24*б*). Вариант этого метода, рассчитанный на выявление вертикальных дефектов (в плоскости EF на рисунке), называют тандем-методом. Для его реализации при перемещении преобразователей A и D поддерживают постоянным значение $l_A + l_D = 2H^* \operatorname{tg}\alpha$. Для получения зеркального отражения от невертикальных дефектов значение $l_A + l_D$ варьируют;

– *реверберационный метод* основан на анализе времени объёмной реверберации (от *позднелат*. reverberatio – отражение) – процесса постепенного затухания звука в некотором объёме – контролируемом объекте. Например, при контроле двухслойной конструкции время реверберации в слое, с которым контактирует преобразователь, будет меньше в случае доброкачественного соединения слоев, так как часть энергии будет переходить в другой слой (рис. 5.24*в*).

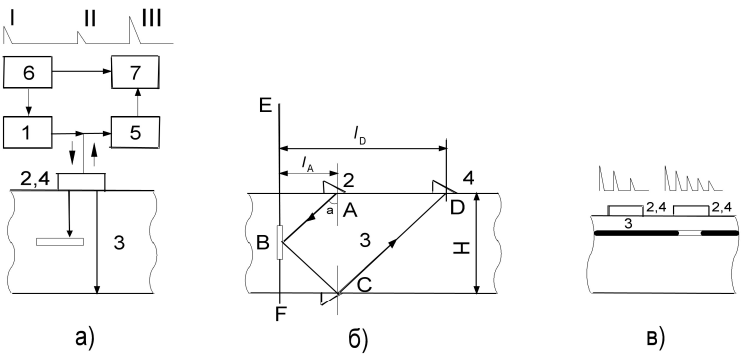


Рис. 5.24 – Методы отражения:
а – эхометод; *б* – зеркальный эхометод; *в* – реверберационный метод;
1 – генератор, *2* – излучатель, *3* – объект контроля, *4* – приемник,
5 – усилитель, *6* – синхронизатор, *7* – генератор развертки.

В *комбинированных методах* спользуют принципы как прохождения, так и отражения акустических волн, сюда относят:

– *зеркально-теневой метод*, основанный на измерении амплитуды донного сигнала. На рисунке 5.25*а* отраженный луч условно смещён в сторону. По технике выполнения (фиксируется эхосигнал) – это метод отражения, а по физической сущности контроля (измеряют ослабление сигнала, дважды прошедшего ОК в зоне дефекта) он близок теневому методу;

– *эхотеневой метод*, основанный на анализе как прошедших, так и отраженных волн (рис. 5.25*б*).

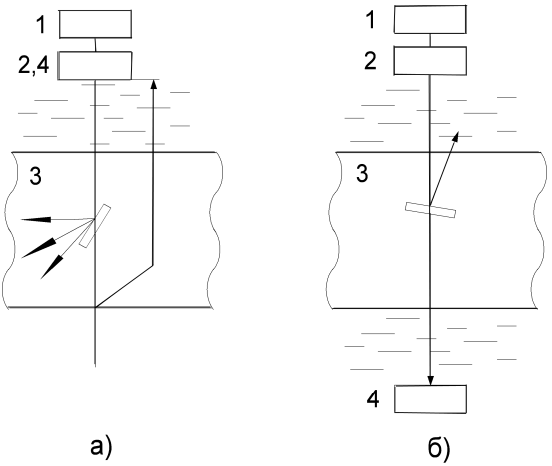


Рис. 5.25 – Комбинированные методы:
а – зеркально-теневой; *б* – эхотеневой; *1* – генератор,
2 – излучатель, *3* – объект контроля, *4* – приемник.

Эхоимпульсный метод широко применяют для контроля различных изделий, в том числе крупногабаритных и сложной формы. При этом контроль проводят при одностороннем доступе к изделию. Метод позволяет обнаруживать дефекты, расположенные в глубине металла и на поверхности, и определять их координаты.

Сущность метода (рис. 5.26) заключается в следующем: упругие колебания вводят в ОК (поз. *1*), как правило, с одной стороны совмещённой искательной головкой (поз. *2*). Излучаемые импульсы называют зондирующими. Их посылают в контролируемое изделие один за другим через определенные промежутки времени – паузы или интервалы. Периодом импульсов называют время, прошедшее от начала действия одного импульса до начала действия следующего. Зондирующий импульс, пройдя сквозь толщу материала, отражается от противоположной (донной) поверхности изделия и, возвращаясь, частично падает на пьезоэлемент искательной головки.

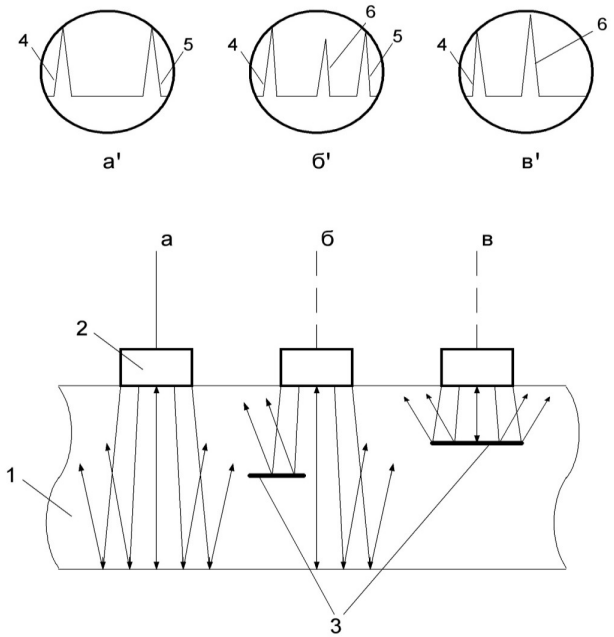


Рис. 5.26 – Схема прозвучивания изделия
эхоимпульсным методом:
а, *б*, *в* – положения искательной головки при контроле изделия;
а', *б'*, *в'* – соответствующие им осциллограммы.

На экране возникает донный импульс *5*. При наличии дефекта *3* импульс отразится от него раньше, чем от противоположной поверхности детали. Между начальным *4* и донным импульсами возникает промежуточный импульс *6*. Если дефект полностью перекрывает путь ультразвуковому пучку, то на экране будут наблюдаться только начальный импульс и импульс от дефекта (рис. 5.26*в*). Измеряя с помощью электронного глубиномера время от момента выхода импульса до момента появления эхосигнала на экране, можно определить расстояние от головки до дефекта $l = Ct/2$, где l – расстояние от головки до дефекта; C – скорость УЗК в материале изделия; t – время распространения УЗК до дефекта и обратно.

Метод акустической эмиссии (от *лат*. emissio – испускание, излучение) основан на регистрации акустических волн в твердых телах при пластической деформации и возникновении микротрещин. Фиксируя скорость движения волн эмиссии, можно не только обнаруживать опасные дефекты, но и прогнозировать остаточный ресурс (живучесть) ответственных элементов конструкций.

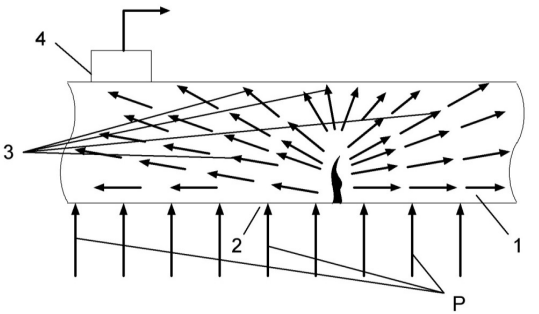


Рис. 5.27 – Схема распространения волн
акустической эмиссии:
1 – ОК; *2* – возникшая трещина; *3* – волны эмиссии;
4 – искательная головка; *P* – волны напряжения.

Сущность метода заключается в следующем. На поверхность ОК устанавливают одну или несколько искательных головок, чувствительных к сдвиговым или поверхностным волнам. При испытании в стенке объекта возникают и развиваются усталостные трещины (рис. 5.27). Их появление сопровождается вспышками эмиссии волн напряжения, носящими импульсный характер. Эти волны распространяются в стенке и воспринимаются искательной головкой. Применяя головки, чувствительные к распространяющимся волнам определенного вида, можно получить короткий и чёткий импульс.

Для диагностирования ОК методом акустической эмиссии следует применять узкополосные приемные искательные головки, работающие на частоте 1–3 МГц.

Импедансный метод основан на анализе изменения механического или входного акустического импеданса участка поверхности контролируемого объекта, с которым взаимодействует преобразователь. Чем больше импеданс, тем «жестче» участок ОК.

В низкочастотном импедансном методе преобразователем является колеблющийся стержень, прижатый к поверхности ОК (рис. 5.28). Появление подповерхностного дефекта в виде расслоения уменьшает механический импеданс ОК; участок поверхности, расположенный над дефектом, становится более податливым, в нем легче возбуждаются изгибные колебания. В результате изменяется параметр колебаний стержня, что служит признаком дефекта.

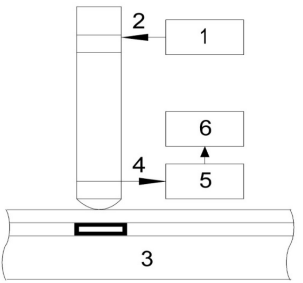


Рис. 5.28 – Импедансный метод НК:
1 – генератор; *2* – излучатель; *3* – ОК; *4* – приемник;
5 – усилитель; *6* – индикатор.

В высокочастотном импедансном методе преобразователь излучает продольную волну. Условия этого возбуждения зависят от акустического импеданса участка поверхности ОК, с которым контактирует преобразователь. Акустический импеданс в свою очередь зависит от наличия или отсутствия дефекта вблизи поверхности.

Метод колебаний предусматривает возбуждение свободных или вынужденных колебаний либо ОК в целом (интегральные методы), либо его части (локальные методы). Свободные колебания возбуждают путём единичного кратковременного внешнего воздействия на ОК, после чего он колеблется свободно. Вынужденные колебания предполагают постоянную связь (через преобразователь) колеблющегося ОК с генератором колебаний, частоту которых изменяют в зависимости от конструктивных параметров ОК и цели исследования. Измеряемыми величинами служат частоты свободных колебаний либо резонансные частоты вынужденных колебаний. Эти частоты связаны с геометрией ОК и скоростью распространения ультразвука в его материале.

В качестве примера на рисунке 5.29 показана схема контроля локальным методом вынужденных колебаний. Зачастую название резонансного относят именно к этому методу контроля. В стенке ОК с помощью пьезопреобразователя возбуждают ультразвуковые волны. Частоту колебаний модулируют и фиксируют частоты, на которых возбуждаются резонансы колебаний (стоячие волны). По резонансным частотам определяют толщину стенки ОК (например, корпусной детали) и наличие в ней дефектов. Появление дефектов, параллельных поверхности ОК, вызывает изменение измеренных значений толщины, а наклонных к поверхности – исчезновение резонансных явлений.

В ряде случаев измерения осуществляют с целью определения изменений амплитуд колебаний при вариации частоты в широком диапазоне – амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), а также параметров затухания колебаний, амплитуд свободных или резонансных колебаний, добротности колебаний, ширины резонансного пика и др. Методы вынужденных колебаний, основанные на анализе колебаний системы ОК – преобразователь в области резонансных частот, называют резонансными.

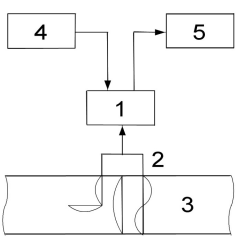


Рис. 5.29 – Резонансный локальный метод:
1 – генератор; *2* – излучатель-приемник; *3* – объект контроля;
4 – модулятор частоты; *5* – регистратор резонансов.

Неразрушающий контроль проникающими веществами.

НК проникающими веществами включает две группы исследовательских методов – течеискание и капиллярный метод.

Течеискание – это вид испытаний на герметичность, основанный на регистрации веществ, проникающих через течи (ГОСТ 26790-85). *Герметичность* – это свойство конструкций препятствовать проникновению через них веществ (газообразных, жидких или парогазовых).

Нарушение герметичности конструкции возникает, если для её изготовления использованы материалы с недопустимо высокой проницаемостью, а также если в процессе её изготовления или эксплуатации возникли течи в отдельных локальных зонах.

Течь – нарушение сплошности конструкции – канал, трещина или пористый участок, нарушающие герметичность. Определение геометрии течей весьма трудная и чаще всего нецелесообразная задача. Поэтому при реализации НК течеисканием о наличии и степени опасности течей судят по количеству газа или жидкости, протекающих через них в единицу времени.

В процессе испытания на герметичность используют пробные, балластные и индикаторные вещества. Основные инициирующие функции выполняет пробное вещество, проникновение которого через течь обнаруживается в процессе контроля. В качестве пробных веществ применяются, как правило, газы с малым молекулярным весом, с низким содержанием их в атмосфере, инертные газы, не взаимодействующие с материалом ОК и веществом внутри них. Рабочее вещество, входящее в ОК, в сочетании с пробным веществом зачастую усиливает эффект индикации. В ряде случаев техническими условиями на изделия не допускается контакта рабочего вещества с пробным, и тогда процесс испытаний таких изделий на герметичность усложняется.

Методы течеискания весьма разнообразны и существенно различаются по чувствительности, избирательной реакции на пробное вещество, принципам обнаружения утечки этого вещества, по виду используемых при реализации метода пробных веществ. Методы контроля герметичности подразделяются на три группы в зависимости от вида применяемых пробных веществ:

– газовые, когда в качестве пробного вещества используется какой-либо газ (гелий, аргон, воздух и др.);

– газо-гидравлические, когда в качестве пробного вещества используется газ, а жидкость играет роль вспомогательной среды при определении факта и места утечки газа;

– гидравлические, когда в качестве пробного вещества используется жидкость, например керосин.

В таблице 5.28 указаны некоторые методы контроля, позволяющие идентифицировать течи в широком диапазоне.

Капиллярный метод контроля (КМК) основан на процессе капиллярного проникновения индикаторных жидкостей в полости не-

сплошностей материала ОК и регистрации образующихся индикаторных следов визуально или с помощью преобразователя. КМК позволяет обнаруживать поверхностные (выходящие на поверхность) и сквозные (соединяющие противоположные поверхности стенки ОК) дефекты. При выявлении слабораскрытых дефектов преимущество КМК состоит в существенном ускорении процесса контроля.

Таблица 5.28 – Основные методы течеискания

Метод	Принципиальные основы метода	Пробное вещество	Предельный порог чувствительности, $м^3 \cdot Па/с$
Масс-спектрометрический	Выделение проникающего через течи пробного вещества путём разделения ионов смеси газов по отношению их массы к заряду и регистрации содержания пробного газа в этой смеси	Гелий, аргон, водород	$1 \cdot 10^{-13}$
Галогенный	Регистрация проникновения пробного вещества через течи по увеличению эмиссии положительных ионов с накаленной металлической поверхности при попадании на нее галогенов	Фреон, трихлорэтилен, четырёххлористый углерод	$1 \cdot 10^{-8}$
Электронно-захватный	Регистрация перетекания через течи электроотрицательных пробных к образованию отрицательных ионов	Воздух, элегаз, кислород	$1 \cdot 10^{-10}$
Катарометрический	Регистрация проникающих через течи пробных веществ, теплопроводность которых отличается от теплопроводности воздуха	Гелий, водород, метан, хлор, углекислый газ	$1 \cdot 10^{-6}$

Продолжение табл. 5.28

Метод	Принципиальные основы метода	Пробное вещество	Предельный порог чувствительности, $м^3 \cdot Па/с$
Оптико-акустический	Регистрация пробных веществ, молекулы которых состоят не менее чем из двух различных атомов, избирательно поглощающих инфракрасное излучение	Метан, углекислый газ, окись углерода, фреон, закись азота	$1 \cdot 10^{-7}$
Акустический	Регистрация вытекающих через течи пробных веществ по интенсивности акустических колебаний, создаваемых струей газа	Любые газы	$1 \cdot 10^{-2}$
Химический	Регистрация проникающих через течи веществ по эффекту химических реакций с индикаторным покрытием	Аммиак	$1 \cdot 10^{-9}$
Манометрический	Регистрация проникающих через течи пробных веществ по изменению общего давления в контролируемом объёме или камере, в которой находится этот объект	Воздух	$1 \cdot 10^{-9}$

Обнаружение сквозных дефектов (течей) является основным предметом методов течеискания, в процессе реализации которых индикаторную жидкость наносят с одной стороны стенки ОК, а регистрируют с другой. При использовании КМК индикацию выполняют с той же поверхности ОК, с которой наносят индикаторную жидкость.

Процесс капиллярного контроля состоит из следующих основных операций, изображенных на рисунке 5.30:

а) очистка поверхности ОК (1) и полости дефекта (2) от жировых и других загрязнений путём их механического удаления и растворения. В результате обеспечивается хорошая смачиваемость всей

поверхности ОК индикаторной жидкостью и возможность проникновения её в полость дефекта;

б) пропитка дефектов индикаторной жидкостью (3). Для этого жидкость должна обладать следующими свойствами: хорошо смачивать материал контролируемой поверхности и проникать в дефекты в результате действия капиллярных сил. Именно по этому признаку метод называют капиллярным. Индикаторная жидкость называется *индикаторным пенетрантом*, или просто *пенетрантом* (от *лат*. penetro – проникаю, достаю);

в) удаление с поверхности изделия излишков пенетранта, при этом пенетрант в полости дефектов сохраняется. Для удаления используют эффекты диспергирования и эмульгирования, применяют специальные жидкости-очистители;

г) обнаружение пенетранта в полости дефектов. Это чаще всего осуществляют визуально, реже – с помощью специальных устройств – преобразователей. В первом случае на поверхности наносят специальные вещества – проявители (4), извлекающие пенетрант из полости дефектов за счёт явлений сорбции или диффузии. Сорбционный проявитель представляет собой порошок или суспензию.

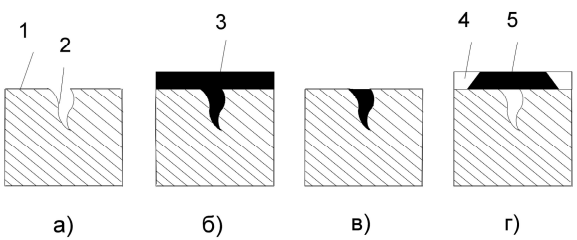


Рис. 5.30 – Основные операции процесса капиллярной дефектоскопии

Пенетрант пропитывает весь слой проявителя (обычно довольно тонкий) и образует следы индикации (5) на его наружной поверхности, которые в основном обнаруживают визуально. Различают *яркостный* (*ахроматический*) метод, в котором индикации имеют более темный тон по сравнению с белым проявителем; цветной метод, когда пенетрант обладает ярким оранжевым или красным цветом, и люминесцентный метод, когда пенетрант светится при воздействии

ультрафиолетового облучения. Заключительная операция при КМК – очистка ОК от проявителя.

Дефектоскопические материалы обозначают индексами: индикаторный пенетрант – «И», очиститель – «М», проявитель – «П». Иногда после буквенного обозначения следуют цифры в скобках или в виде индекса, означающие особенность применения данного материала.

Эффективность применения средств неразрушающего контроля и диагностики. Определение эффективности применения средств НК и диагностики является важным этапом формирования и выполнения требований по повышению уровня достоверности результатов контроля изделий и их элементов при диагностике. В настоящее время существуют различные способы определения эффективности применения средств НК и диагностики. Как правило, они рассматриваются в рамках технико-экономического анализа и учитывают полезный результат применения системы контроля и затраты на нее. По одному из способов эффективность неразрушающего контроля и диагностики отображается критерием Q эффективности, характеризующим соотношение меры G_j соответствия системы и затрат $Э_{\Sigma j}$ по формуле

$$Q_i = G_j / Э_{\Sigma j}. \qquad (5.114)$$

Для расчёта величины G_j как приращения вероятности исключения аварийной ситуации необходимо знать:

– типичные дефекты, формируемые повреждающими процессами в ОК, и их потенциальную опасность;

– распределения дефектов в ОК;

– вероятности обнаружения дефектов по каждому из возможных вариантов применения систем диагностики.

По другому способу определяется только экономическая эффективность применения возможных средств НК и диагностики. В этом случае расчёт ведется по формуле

$$Э = \left[(З_{э1} - З_{э2}) + З_{и1}\left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}\right) + \frac{З_{и1} - З_{и2}}{t_2} \right] N, \qquad (5.115)$$

где $З_{э1}$, $З_{э2}$ – суммы среднегодовых затрат, связанных с эксплуатацией продукции соответственно до и после внедрения средств диагностики; $З_{и1}$, $З_{и2}$ – суммы затрат на изготовление единицы продукции соот-

ветственно до и после внедрения средств диагностики; t_1, t_2 – сроки службы изделия соответственно до и после внедрения средств диагностики; N – количество единиц продукции, по которому рассчитывается экономическая эффективность.

Рассмотренные способы определения эффективности дают обобщенную технико-экономическую оценку достоинств и недостатков применения конкретных средств НК и диагностики. В то же время существуют задачи, для решения которых стоимостные показатели не играют решающей роли. В первую очередь это задачи, связанные с безусловным обеспечением безопасности жизни и здоровья людей, сохранности особо ценных грузов, обеспечения обороноспособности, экологической безопасности и ряд других. В подобных ситуациях применяется методика оценки эффективности применения конкретных средств НК и диагностики на основе допустимых рисков с использованием положений теории информации.

В теории информации центральное место занимает понятие энтропии системы, которая в первую очередь характеризует степень её неопределённости. Под системой будем понимать совокупность контрольных операций конкретного вида неразрушающего контроля по определению контролируемых параметров и выявлению дефектов. В данном случае энтропия А системы контроля представляет собой среднее значение энтропий контрольных операций A_j по выявлению определенных дефектов. Для вычисления энтропии системы контроля используется выражение

$$H_k(A) = \sum_{i=1}^{n} p_k(A_i) H_k(A_i), \tag{5.116}$$

где k – вид НК; i – тип выявляемого дефекта; $p_k(A_i)$ – вероятность определения i-го типа дефекта k-м видом НК; $H_k(A_i) = \log(1/p_k(A_i))$ – энтропия контрольной операции k-го вида НК.

Для сравнения различных систем контроля в случае определения одного и того же типа дефекта рассчитывается величина информации как разность неопределенности состояния (энтропии) системы до и после контроля

$$J_k = H_k(A) - H_k^*(A). \tag{5.117}$$

При решении ответственных задач любое отклонение от установленных требований недопустимо. Поэтому можно считать, что объект диагностики имеет равные вероятности быть в исправном и

неисправном состоянии. В таком случае начальная энтропия системы контроля рассчитывается по формуле

$$Hk(A) = -1/2\log(1/2). \qquad (5.118)$$

Применяется пятибалльная система оценки выявления каждого типа дефекта. Если её совместить с вероятностной системой оценки и 1 баллу поставить в соответствие 20% вероятности обнаружения дефекта, то данные по выявлению дефектов в металле оптическим, радиационным, магнитным, капиллярным, вихретоковым и акустическим методами неразрушающего контроля и диагностики могут быть представлены в виде таблицы 5.29. В данном случае количество информации, приобретаемое при выяснении состояния объекта диагностики в зависимости от вида дефекта и применяемого метода НК и диагностики, – сумма исходного состояния объекта и частной информации от сообщения системы контроля.

Таблица 5.29 – Вероятность обнаружения дефектов в металлах методами НК и диагностики

Дефект	Вид НК и диагностики					
	Оптический	Радиационный	Магнитный	Капиллярный	Вихретоковый	Акустический
Неметаллические, шлаковые, флюсовые включения	0	0,8	0	0	0,4	0,8
Вмятины	0,8	0	0	0	0,4	0
Волосовины	0	0	0,95	0	0,6	0
Грубозернистость околошовной зоны	0	0	0	0	0,4	0,8
Закаты	0,4	0	0	0,4	0,6	0,6
Заковы	0,4	0	0,4	0,4	0,6	0,6
Заливины	0,8	0	0	0	0,4	0
Коррозия:						
атмосферная	0,6	0	0	0,6	0,8	0,8
межкристаллитная атмосферная	0,8	0	0	0,8	0,8	0
поверхностная газовая	0,6	0	0	0,8	0,8	0,8
высокотемпературная	0,6	0	0	0,8	0,8	0,8
межкристаллитная поверхностная	0,6	0	0	0,8	0,8	0
Ликвация:						
дендритная	0	0,4	0	0	0	0
зональная	0	0,4	0	0	0	0
по плотности	0	0,4	0	0	0	0
Металлургич. дефекты сварн. шва	0	0,8	0,6	0	0,4	0,8
Наруш. диффузионного сцепления	0	0	0	0	0	0,8

Продолжение табл. 5.29

Дефект	Вид НК и диагностики					
	Оптический	Радиационный	Магнитный	Капиллярный	Вихретоковый	Акустический
Науглероживание	0	0	0,8	0	0,8	0
Непровар	0	0,6	0,6	0	0	0,8
Непроклей	0	0	0	0	0	0,8
Непропай	0	0,6	0	0	0	0,8
Неслитины	0,4	0,4	0	0	0,4	0,6
Несоотв. заданной структуре	0	0	0,6	0	0,8	0
Несоотв. толщины закаленного слоя при обработке ТВЧ	0	0	0,8	0	0,8	0,8
Несоотв. заданному значению толщины цементированного, азотированного, оксидированного и других слоев	0	0	0,6	0	0,8	0,6
Несоотв. заданному значению толщины гальванического покрытия	0	0	0,8	0	0,8	0
Обезуглероживание	0	0	0,8	0	0,8	0
Оксиды, плены, корочки	0	0	0	0,4	0,4	0,6
Перегрев	0	0	0,6	0	0,6	0,6
Пережог	0	0	0,6	0	0,6	0,6
Плены	0,6	0	0	0	0	0
Механические повреждения поверхности	0,8	0	0	0	0	0
Газовая пористость	0	0,8	0,4	0,4	0,8	0,6
Пресс-утяжины	0	0,8	0	0	0	0,2
Прижоги	0	0	0,95	0	0,6	0
Газовые пузыри	0	0	0	0	0	0,6
Мягкие пятна	0	0	0	0	0,8	0
Разнотолщинность (листов)	0	0,6	0,6	0	0,6	0,2
Разностенность прессованных или тянутых полуфабрикатов	0	0,6	0,6	0	0,6	0,2
Разностенность труб, полок, профилей	0	0,2	0,6	0	0,6	0,2
Внутренние разрывы	0	0,2	0	0	0	0,8
Усадочные раковины	0	0,8	0	0	0	0,8
Расслоения	0	0	0	0	0	0,8
Усадочная рыхлость	0	0,8	0	0,4	0	0,6
Расслоения:						
деформационные	0	0	0	0	0	0,8
продольного шва	0	0	0	0	0,8	0,8
Коррозионное растрескивание под напряжением	0	0	0,6	0,8	0,8	0,8
Растрескивание при хранении	0,6	0	0,8	0,8	0,8	0,8
Рванины	0,95	0	0	0,8	0,8	0,8
Риски	0,8	0	0	0,8	0,8	0,4
«Скворечники»	0,4	0,8	0	0	0,4	0,8
Грубозернистая структура	0	0	0,6	0	0,6	0,6

Продолжение табл. 5.29

Дефект	Вид НК и диагностики					
	Оптический	Радиационный	Магнитный	Капиллярный	Вихретоковый	Акустический
Трещины:						
водородные	0	0	0,95	0,95	0,2	0,2
горячие	0	0,6	0	0,4	0,4	0,8
клепаных соединений	0	0,6	0,4	0	0,8	0,8
контактные	0,6	0	0,6	0	0,6	0,6
отделочные	0	0	0,8	0,8	0,8	0,8
отслаивания	0	0	0,6	0,6	0,4	0,8
поверхностные, внутренние	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
ползучести	0,6	0	0,6	0,8	0,8	0,8
рихтовочные, монтажные	0	0,8	0,8	0,95	0,2	0,2
сварочные	0	0,8	0,6	0	0,4	0,2
термические (в т. ч. закалочные)	0	0	0,8	0,8	0,8	0,8
термической усталости	0,6	0	0	0,8	0,8	0,8
усталостные	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8
холодные	0,4	0,6	0	0,4	0,4	0,8
шлифовочные	0	0	0,95	0,95	0,8	0
Закалочные микротрещины	0	0	0	0,6	0,6	0,2
Флокены	0	0	0,8	0	0	0,8

В результате расчётов по данным таблицы 5.29 получены значения количества информации, предоставляемые различными видами НК и диагностики при выявлении дефектов в металлах и сплавах. Они сведены в таблицу 5.30. Их анализ показывает, что наибольшей информативностью (при выбранных ограничениях) обладает акустический метод НК (среднее значение количества информации 0,5 бит), а наименьшей – оптический метод (среднее значение количества информации 0,19 бит). Информативность остальных методов находится между ними.

Таблица 5.30 – Суммарное и среднее количество информации по всем видам дефектов

Количество информации по всем видам дефектов, бит	Вид НК и Д					
	Оптический	Радиационный	Магнитный	Капиллярный	Вихретоковый	Акустический
Суммарное	13,05	14,57	21,4	17,88	32,45	34,47
Среднее	0,19	0,21	0,31	0,26	0,47	0,50

В ряде практических ситуаций наиболее опасными дефектами, возникновение которых обуславливает появление средних и тяжелых отказов, являются трещины и коррозионные повреждения. Эффективность применения наиболее распространённых методов НК при обнаружении названных дефектов проиллюстрирована соответственно на рисунках 5.31 и 5.32.

Анализ данных рисунков 5.31 и 5.32 показывает, что при обнаружении трещин средняя информативность всех методов НК повышается. Лучшим остается акустический метод контроля (0,64 бит); к нему близки по информативности вихретоковый (0,61 бит) и капиллярный (0,56 бит) методы НК.

При обнаружении дефектов, обусловленных коррозионными процессами, наибольшую информацию можно получить, используя вихретоковый (0,74 бит) и капиллярный (0,71 бит) методы НК. Никакой информации не даёт применение радиационного и магнитных методов.

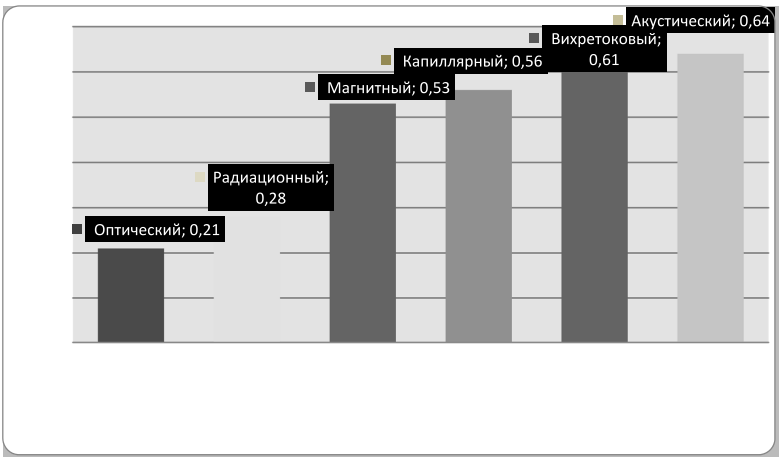


Рис. 5.31 – Среднее количество информации (бит) при обнаружении трещин различными методами НК

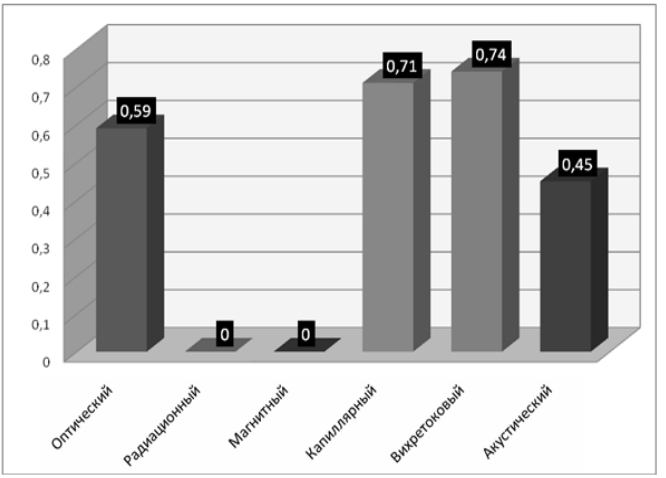


Рис. 5.32 – Среднее количество информации (бит) при обнаружении коррозионных повреждений различными методами НК

Таким образом, для определения эффективности применения различных методов и средств НК и диагностики достаточно сравнить величины информации, получаемые при контроле одного и того же дефекта различными методами с использованием соответствующих баз данных, например данных таблицы 5.30.

6. Системные задачи надёжности машин

Конструкция современной машины состоит из тысяч отдельных деталей, и каждая из них должна безотказно функционировать в течение заданных промежутков времени, величины которых зависят от назначенных и реально обеспечиваемых показателей надёжности – безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости.

Варьируя известными показателями надёжности составных частей, сформируем методику оценки надёжности машины как сложной системы.

Для решения поставленной задачи необходимо иметь идеализированное представление о машине как совокупности элементов, находящихся в определённом соотношении, иначе говоря, разработать расчётную схему. Последняя в основном определяется постановкой задачи, особенностями конструкции машины и правилами её эксплуатации.

Под элементом машины следует понимать составную часть её конструкции, которая может характеризоваться собственными входными и выходными параметрами и рассматривается как неделимая.

Выходной параметр характеризует и обобщает результаты протекания повреждающих процессов при использовании изделия по назначению (например, интенсивность изнашивания фрикционного диска, усталостная долговечность вала и др.).

Выбор конкретного критерия для включения элементов в расчётную схему зависит от постановки задачи, определения математических, физико-химических и технических возможностей моделирования и назначения адекватной модели.

С целью минимизации уровня сложности расчётной схемы элементы объединяют в 5 групп:

– элементы, отказы которых практически не влияют на работоспособность и выходные параметры машины;

– элементы, работоспособность которых за рассматриваемый промежуток времени практически не изменяется;

– элементы, для которых контроль технического состояния, ремонт и техническое обслуживание возможно осуществить, не прерывая типового рабочего цикла использования машины по назначению;

– элементы, отказы которых за рассматриваемый период времени могут привести к постепенным отказам машины;

– элементы, которые одновременно имеют ограниченную контролепригодность в эксплуатации, подвержены отказам, приводящим к возникновению аварийных ситуаций, и могут быть изъяты из машины только в стационарных условиях с использованием специального оборудования.

В расчётную схему следует включить элементы пятой и, в отдельных случаях, четвёртой групп. В итоге расчётная схема будет содержать необходимое и достаточное количество элементов.

Многообразие вариантов связей между элементами и их влияние на выходные параметры машины моделируют структурной функцией. Под структурой далее подразумевается формальное отображение указанных связей.

Если система состоит из элементов, выходные параметры которых не участвуют в формировании любого из выходных параметров системы, а изменение выходного параметра такого элемента не влияет на работу других элементов, то в этом случае мы имеем систему с ***расчленяемой структурой***.

Для системы со ***связанной структурой*** характерны следующие случаи взаимодействия элементов:

– выходной параметр элемента участвует в формировании одного или группы выходных параметров системы;

– выходной параметр элемента влияет на состояние других элементов, для которых его применение эквивалентно изменению определяющих условий работы – изменению уровня вибраций, коэффициента трения, температуры и др.

Для конструкции большинства машин характерна ***комбинированная структура***, т. е. наличие подсистемы со связанными расчленёнными структурами.

6.1. Применение теории графов при оценке показателей надёжности

В исследованиях надёжности технических систем, различных по назначению и принципу функционирования, весьма удобно использовать математические модели, сформированные на основе теории графов. С помощью графов можно описывать структуру многих технических систем, находить показатели надёжности, строить модели надёжности систем, которые изначально не имеют сетевой структуры.

Графом называется совокупность вершин (узлов) и ребер, связанных между собой, т. е. это такая абстрактная математическая си-

стема, которая состоит из двух множеств – вершин и ребер и отображения множества вершин и множества ребер. Различные узлы графа связаны между собой (не обязательно все) рёбрами. На рисунке 6.1 представлен пример графа, состоящего из 3 вершин и 4 рёбер.

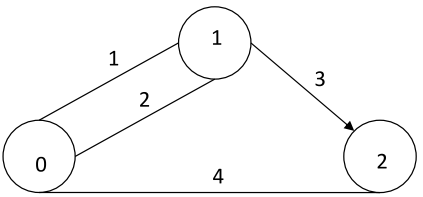


Рис. 6.1 – Пример графа

В каждый узел может входить или из узла может выходить несколько рёбер. В этом случае говорят о множестве рёбер, *инцидентных* данному узлу графа. Каждому ребру инцидентны два узла, расположенные на его концах. Сами рёбра могут быть простыми (рёбра *3*, *4*) и кратными (рёбра *1*, *2*), направленными (ребро *3*) и ненаправленными (рёбра *1*, *2*, *4*). Кратные рёбра – это несколько (как правило, идентичных) рёбер, инцидентных одной и той же паре вершин. В противном случае рёбра называются простыми.

Направленные ребра иногда называются дугами. Если по ненаправленному ребру допускается идентичная связь от одной вершины к другой, то для направленного ребра (дуги) один из узлов является источником, а второй – стоком, и передача потока в обратном направлении по дуге невозможна.

Если в конечном графе, т. е. в графе, включающем конечное число вершин, из любой вершины через конечное число рёбер (или дуг) можно попасть в любую другую вершину, то говорят о *связности графа*. Рассмотрим, как эти абстрактные понятия теории графов находят своё применение в прикладных задачах надёжности.

Имеются две альтернативные методики определения метода показателей надёжности. Одна из них – методы анализа влияния отказов, когда осуществляется оценка воздействия повреждения отдельных элементов на поведение системы, вторая – анализ деревьев отказов, позволяющий выявить причины возможных отказов.

Когда проводится анализ влияния отказов для некоторой подсистемы, которая входит как составная часть в более общую систему,

необходимо установить виды отказов отдельных элементов подсистемы. Определяется, какие последствия имеют отказы отдельных элементов на всю подсистему. При этом целесообразно начинать анализ с функций, которые должны выполняться соответствующими составными частями. Далее определяется, при каких обстоятельствах наступает отказ данного вида. От этого зависит, будет ли наступивший отказ обнаружен сразу или он может остаться вначале незамеченным. Следует также выяснить, как влияют те или иные виды отказов на систему более высокого ранга.

В исследованиях надёжности сложных систем часто рекомендуется комбинация анализа деревьев отказов с методом анализа влияния отказов. При этом для определённых «критических событий» удаётся определить как их возможные последствия, так и их возможные причины.

Причинно-следственная диаграмма для некоторого определенного «критического события», например превышения давлением или температурой предельного допустимого значения, позволяет, с одной стороны, выявить его причины (диаграмма причин), а с другой стороны – все возможные последствия (диаграмма последствий). Диаграмма причин интерпретируется как дерево отказов, причём «критические события» играют роль отказов системы. Диаграмма последствий представляет собой дерево решений и рисков, описывающее различные последствия отказов, к которым приводят критические события в случае неуспеха защитных мероприятий.

На практике метод причинно-следственных диаграмм применяется, прежде всего, для сложных систем, оборудованных устройствами диагностики и аварийной защиты.

Наиболее распространённым способом представления сложных систем являются *двухполюсные схемы*, формируемые по принципу вход (полюс 1) – выход (полюс 2). Системы подразделяются на последовательные, параллельные и комбинированные.

Последовательной системой называется такая система, которая работоспособна только в том случае, если работоспособны все её элементы. Если вместо работоспособности говорить о состоянии отказа, то последовательная система отказывает, если отказывает хотя бы один её элемент.

Последовательные системы встречаются в технике очень часто. Для многих мобильных машин, например, передача тягового момента осуществляется по последовательной схеме: двигатель – сцепление –

коробка перемены передач – карданный вал – редуктор ведущего моста.

Здесь в качестве примера рассмотрим более длинную последовательную систему, например, электронный блок системы навигации (БСН), содержащий следующие подсистемы (элементы): высокочастотный приёмно-передающий блок с антенной (H), блок предварительного усиления (M), генератор (O), блок усиления промежуточной частоты (Z), демодулятор (D), монитор (N), источник питания (S), корпус (G).

Буквы в скобках условно обозначают случайные события – работоспособные состояния элементов. Событие, соответствующее отказу элемента, помечается чертой сверху, т. е. ($\overline{H}$), ($\overline{M}$), ($\overline{O}$), ($\overline{Z}$), ($\overline{D}$), ($\overline{N}$), ($\overline{S}$), ($\overline{G}$).

Очевидно, для того, чтобы наступило желаемое событие (обозначаемое здесь R) – «БСН работоспособен», необходимо чтобы наступили все перечисленные события.

Эту взаимосвязь можно изобразить с помощью расчётной схемы надёжности БСН по критерию работоспособности (рис. 6.2). Путь, соединяющий исходный узел A с конечным узлом E на схеме расчёта надёжности, существует только тогда, когда работоспособны все элементы.

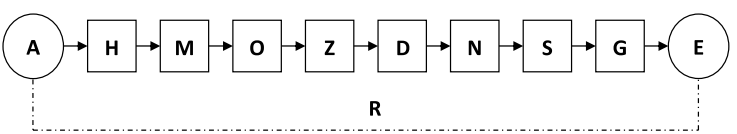


Рис. 6.2 – Схема расчёта надёжности БСН по критерию работоспособности

Схема расчёта надёжности БСН по критерию отказа изображена на рисунке 6.3.

Начальный и конечные узлы сети обозначены здесь соответственно через $\overline{A}$ и $\overline{E}$. Поскольку система неработоспособна, если отказал хотя бы один элемент, то начальные и конечные узлы всех рёбер должны совпадать соответственно с начальным узлом системы $\overline{A}$ и с её конечным узлом $\overline{E}$, поэтому все события на рисунке 6.3 представлены параллельно включёнными элементами.

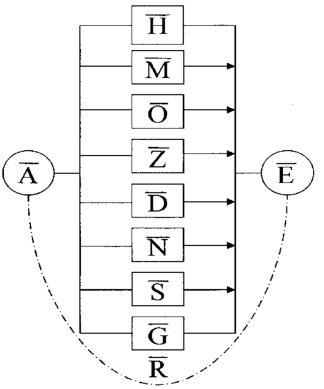


Рис. 6.3 – Схема расчёта надёжности БСН
по критерию отказа

При построении дерева отказов исходят из отказа системы («вершинное событие») и сводят это событие к отказам элементов («базисные события»).

Логические связи между базисными событиями, которые порождают вершинное событие, отражаются в направленном графе, имеющем древовидную структуру. Дерево отказов для примера с БСН показано на рисунке 6.4.

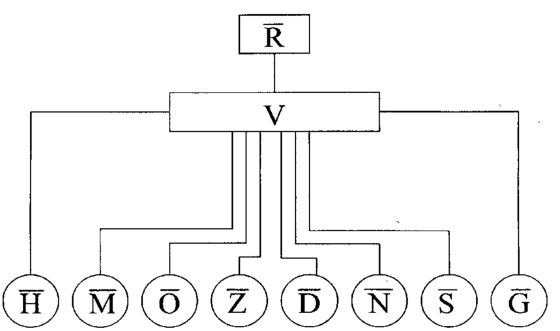


Рис. 6.4 – Дерево отказов

Базисные события $\overline{N}$, $\overline{M}$, $\overline{O}$, …, $\overline{G}$ связаны между собой логическими звеньями ИЛИ (знак $\vee$).

Менее употребительным является построение так называемых деревьев работоспособности. Для примера с БСН дерево работоспособности имеет вид, изображённый на рисунке 6.5. События N, M, O соединены логическими звеньями И (знак $\wedge$).

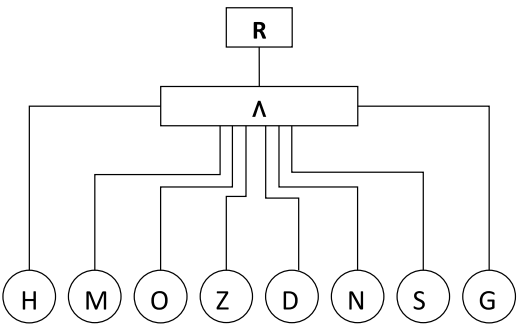


Рис. 6.5 – Дерево работоспособности

Параллельной системой называется такая система, которая работоспособна, если работоспособен хотя бы один из её элементов; она отказывает тогда и только тогда, когда отказывают все её элементы.

Параллельные системы также часто встречаются в реальных технических системах. Для неё расчётная схема надёжности по критерию работоспособности изображается в виде параллельного включения элементов, обозначающих соответствующие события.

Пусть событие, состоящее в том, что v-й элемент работоспособен, обозначается через X_v, $v = 1, ..., n$. Событие, состоящее в работоспособности системы, обозначим через S, а состояния отказа помечаются чертой сверху.

Тогда для параллельной системы имеем четыре формы графического представления, изображённые на рисунке 6.6.

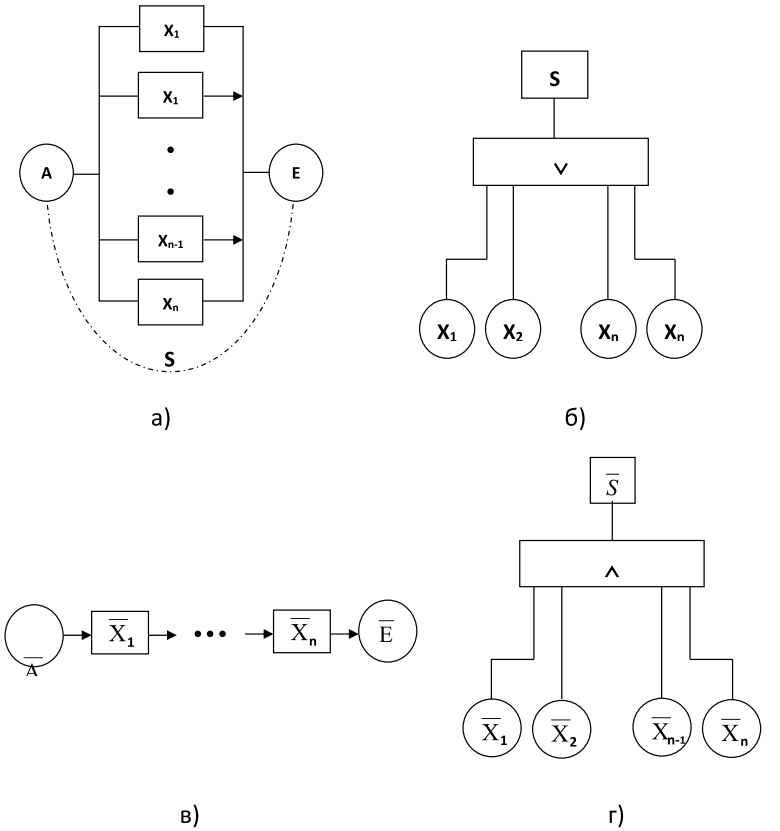


Рис. 6.6 – Различные формы графического представления схем расчёта надёжности для параллельной системы

Часто оказывается, что исследуемая техническая система не является чисто параллельной или последовательной, а представляет собой синтез этих двух типов, т. е. является комбинированной системой (рис. 6.7).

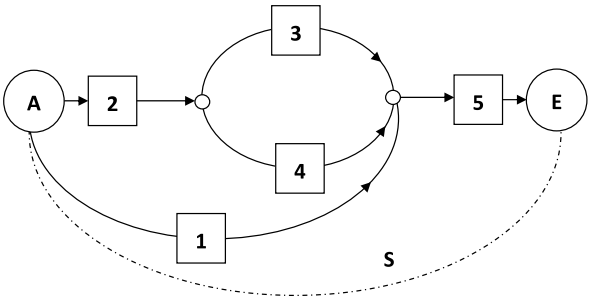


Рис. 6.7 – Пример комбинированной системы (синтез параллельной и последовательной систем)

Одни и те же расчётные схемы надёжности могут получаться для совершенно различных объектов. Например, элементы *1*, *2*, *3*, *4*, *5* на рисунке 6.7 могут означать отрезки трубопровода.

Другой пример, который также приводит к расчётной схеме надёжности, изображённой на рисунке 6.7, состоит в следующем. Система представляет собой систему водоснабжения. Для подачи воды имеется два электрических насоса. Возможностями отказов, связанных с разрывами труб, пренебрегаем. Обозначим элементы системы цифрами: *1* – ручной насос; *2* – система электроснабжения; *3* – первый электронасос; *4* – второй электронасос, *5* – уровень воды в скважине. Легко проследить за влиянием отдельных элементов на надёжность системы. Очевидно, пятое событие, состоящее в том, что уровень воды в скважине недостаточен, особенно существенно: всякий раз, когда это событие наступает, оно ведёт к отказу системы.

В зависимости от задачи исследования на практике отдаётся предпочтение тому или иному из четырёх способов представления расчётных схем надёжности:

– расчётной схеме по критерию работоспособности;
– расчётной схеме по критерию отказа;
– дереву отказов;
– дереву работоспособности.

Однако принципиально они аналогичны и могут быть сведены одна к другой. Если сравнить модели надёжности, имеющие вид двухполюсных сетей, с моделями, имеющими вид деревьев, то видна тесная связь между деревьями отказов и расчётными схемами надёжности по критерию отказа, с одной стороны, и деревьями работоспособности – с другой.

При формировании дерева отказов исходят из определенного нежелаемого вершинного события и анализируют возможные причины его возникновения. При этом, естественно, стремятся к разумной степени детализации. Готовое дерево отказов представляет в виде логической диаграммы все последовательности событий, которые могут привести к основному событию.

С помощью метода деревьев отказов получают:

– систематизированное представление всех возможных причин вершинного события (отказа системы) и их взаимодействие;

– обозримый и доступный для изучения материал анализа причин отказа;

– параметры надёжности системы, полученные в результате количественного анализа деревьев.

Построение дерева отказов предполагает детальный анализ процесса функционирования системы.

Одному и тому же вершинному событию, как правило, можно поставить в соответствие несколько различных деревьев отказов. Прежде чем начать построение дерева отказов, нужно выполнить следующие предварительные действия:

– проанализировать (при необходимости – составить) детальное описание рабочего процесса рассматриваемой системы, включая анализ подсистем (схемы, описания конструкции и т. д.), в том числе всех значимых параметров элементов;

– проанализировать физические и химические свойства материалов, используемых в устройствах, связанных или соседствующих с рассматриваемой системой;

– проанализировать характеристики безотказности, которые для элементов исследуемой системы должны быть известны;

– использовать соответствующую удобную символику обозначений.

Исходным моментом построения дерева отказов является установление вершинного события для исследуемой системы. Далее рассматриваются возможности представления вершинного события как отказ одного из элементов системы. Если это возможно, то такое событие соединяется звеном ИЛИ с тремя входами: «первичный отказ», «вторичный отказ» и «эксплуатационный отказ». Если это не так, то пытаются свести вершинное событие к таким отказам, которые сами по себе или совместно порождают основное событие.

Необходимо следить, чтобы список причин был полным, так как упущение возможных событий, приводящих к отказам, является основной причиной погрешностей при построении деревьев отказов.

Установленные события – отказы, как и вершинное событие, подвергаются дальнейшей детализации. Из каждого такого события развивается «ветвь дерева».

Первичные отказы не подвергаются дальнейшей разработке. Если вторичные и эксплуатационные отказы обусловлены причинами, выходящими за рамки рассматриваемой системы, то они также дальше не изучаются. В противном случае они исследуются подобно вершинному событию.

При графическом изображении деревьев отказов принято использовать следующие общие условия:

– вершинное событие, а также все полученные события, которые далее разрабатываются при построении дерева отказов, обводятся прямоугольной рамкой;

– неисследуемые далее вторичные и эксплутационные отказы обводятся ромбиками;

– первичные отказы обводятся кружками;

– в качестве символов-указателей, с помощью которых, например, можно переносить части дерева отказов на другой лист, используются треугольники, содержащие внутри цифры.

На рисунке 6.8 изображена общая схема построения дерева отказов.

Рассмотрим примеры построения деревьев отказов с помощью схемы на рисунке 6.8.

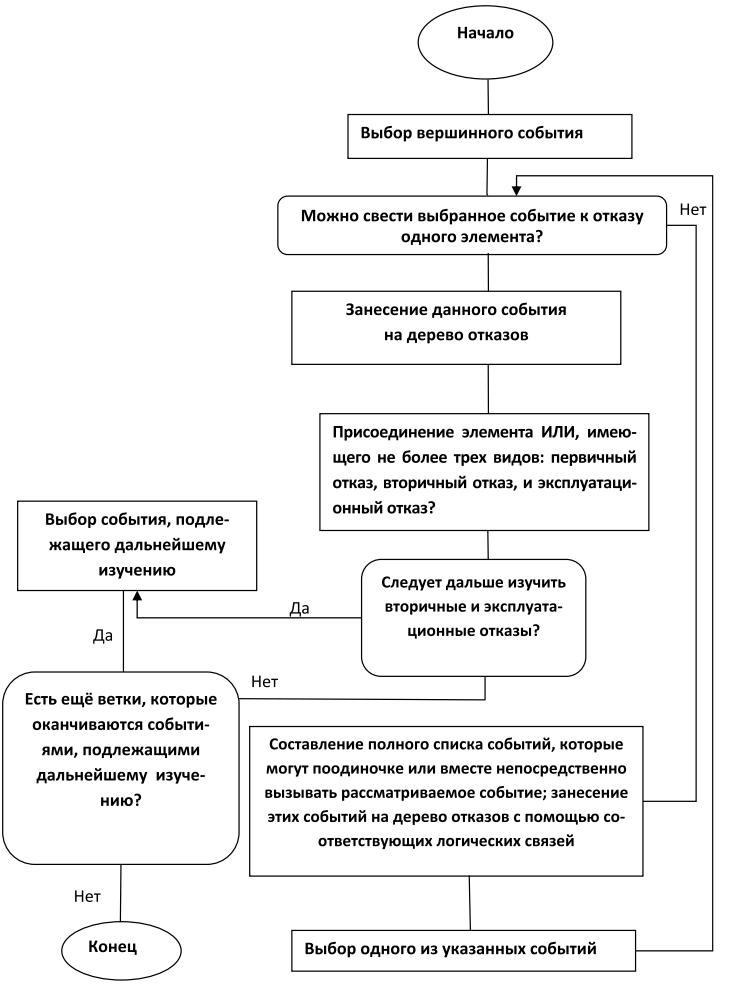


Рис. 6.8 – Общая схема построения дерева отказов

На рисунке 6.9 представлена простая электрическая схема постоянного тока. Потребители тока – двигатель М и омическое сопро-

тивление R – включены последовательно. Кроме того, имеется предохранитель Si. Источник постоянного тока обозначен через Q, выключатель – через S.

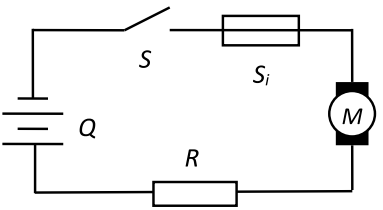


Рис. 6.9 – Пример электрической схемы постоянного тока

Необходимо построить деревья отказов для следующих двух нежелательных событий:

– H_1 – двигатель перегорел;

– H_2 – двигатель не работает после включения с помощью S.

Вначале выберем в качестве вершинного события событие H_1. Это событие является одним из возможных отказов элементов в системе.

Данный отказ может быть вызван как первичным отказом двигателя (замыкание в обмотке, ошибка в подключении клемм), так и вторичным. Эксплуатационные отказы могут быть в этом случае исключены.

На дереве отказов (рис. 6.10) присутствуют только элементы ИЛИ (V). Наступление каждого из нерассматриваемых далее базисных событий вызывает вершинное событие.

Следует обратить внимание на то, что недетализуемые далее события не должны быть обязательно независимыми друг от друга. В примере имеются две пары первичных отказов: разрыв и короткое замыкание сопротивления R, отсутствие и превышение напряжения на выходных клеммах источника Q.

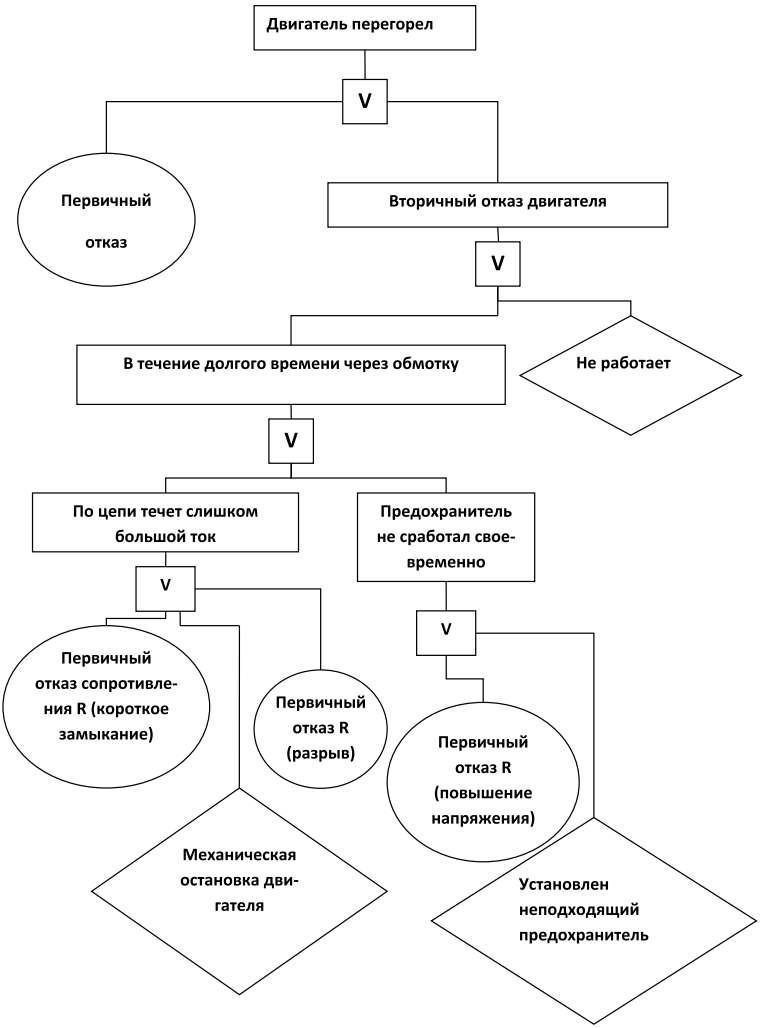


Рис. 6.10 – Дерево отказов для вершинного события H_1

Два различных вида отказов одного и того же элемента никогда не могут иметь место одновременно, следовательно, они не являются взаимно независимыми.

Первичный отказ двигателя можно далее не исследовать. Причиной вторичного отказа может быть состояние самой схемы (точнее, совокупность прочих элементов) или внешнее событие, которое приводит, например, к сильному повышению температуры окружающей среды. Схема (включая источник Q) приводит к вторичному отказу, если через двигатель длительно проходит слишком большой ток. Это событие не может быть сразу сведено к отказу одного элемента. Его причиной может быть недопустимо большая величина тока в течение долгого времени во всей цепи, который был отключён своевременно предохранителем. Причиной слишком большого тока могут быть оба элемента, входящие в цепь, и, кроме того, вал двигателя может «заклинить» вследствие чрезмерно высокого нагрузочного момента, недопустимого режима трения, коррозии и т. д. Большой ток может быть вызван также коротким замыканием потребителя R или повышением напряжения на клеммах источника Q.

Теперь выберем в качестве вершинного события H_2. Дерево отказов для него показано на рисунке 6.11.

Все эти отказы рассматриваются здесь как первичные и не исследуются далее. Полученное дерево отказов изображено на рисунке 6.10.

Предохранитель *Si*, как видно из рисунков 6.10, 6.11, предотвращает события H_2. Более того, наличие предохранителя делает это событие более частым, так как отказ предохранителя сам по себе уже приводит к событию H_2. В то же время предохранитель предотвращает наступление события H_1. Это находит отражение на рисунке 6.10 в наличии звена И (^).

Таким образом, очевидно, что при использовании методики построения деревьев отказов можно получить весьма полное и наглядное представление обо всех возможных причинах отказа системы и взаимодействии этих причин.

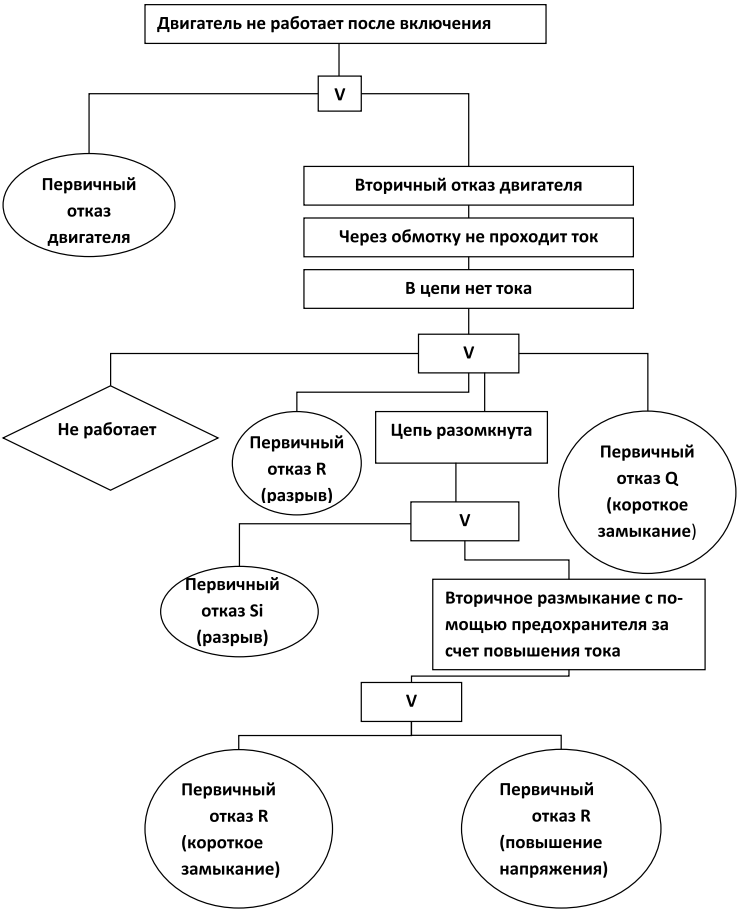


Рис. 6.11 – Дерево отказов для вершинного события H_2

6.2. Структурные функции технических систем

Ранее нами отмечалось, что в технических системах имеются два вида зависимостей:

– между элементами системы;

– зависимость элемент – система.

При выборе структурных функций (математических моделей структур) преобладающей является зависимость элемент – система.

Для обозначения *i*-го элемента системы принимаем булевы переменные:

$$x_i = \begin{cases} 1, \text{если i-й элемент в работоспособном состоянии;} \\ 0, \text{если i-й элемент в в неработоспособном состоянии.} \end{cases}$$

При этом состояние системы, имеющей *n* элементов, можно характеризовать *n*-мерным вектором $x=(x_1,x_2,\ldots,x_n)$.

Множество возможных состояний системы будет равным 2^n. В зависимости от конкретной структуры системы всё это множество состоит из двух подмножеств, соответствующих состояниям работоспособности и неработоспособности системы. Тогда на множестве $X \subseteq R^n$ представляется целесообразным задать определённую булеву функцию $\varphi(x)$, которая называется *структурной функцией:*

$$\varphi = \begin{cases} 1, \text{если система находится в работоспособном состоянии;} \\ 0, \text{если система находится в неработоспособном состоянии.} \end{cases}$$

Предполагая далее, что состояние системы полностью определяется состоянием её элементов, можно записать как

$$\varphi = \varphi(x), \tag{6.1}$$

где $x = (x_1, \ldots\ldots, x_n)$.

Рассмотрим несколько простейших структур системы и соответствующих булевых функций.

Последовательная структура системы – структура, при которой отказ хотя бы одного элемента системы приводит к её отказу. Это свойство системы представляется с помощью формулы структурной функцией последовательной системы:

$$\varphi(x) = \prod_{i=1}^{n} x_i \equiv \min(x_1, \ldots, x_n). \tag{6.2}$$

Графическое представление структуры приведено на рисунке 6.12.

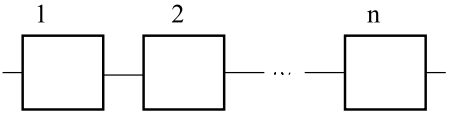


Рис. 6. 12. – Последовательное соединение элементов

Система с *параллельной структурой* (рис. 6.13) работоспособна тогда, когда работоспособен хотя бы один из её элементов. Структурная функция в этом случае:

$$\varphi(x)=\coprod_{i=1}^{n} x_i \equiv \max(x_1,...,x_n), \tag{6.3}$$

где $\coprod_{i=1}^{n} x_i \equiv 1-\prod_{i=1}^{n}(1-x_i)$.

Дополнительно вводится обозначение: $x_1 x_2 = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2)$.

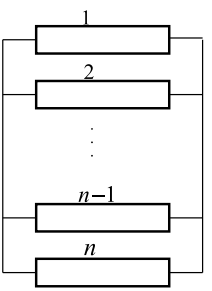


Рис. 6.13 – Параллельное соединение элементов

Структура системы, при которой она работоспособна только тогда, когда не менее k из n элементов работоспособны, называют структурой типа «k из n». Структурная функция такой системы представляется в виде системы

$$\varphi(x)=\begin{cases} 1, \text{ если } \sum_{i=1}^{n} x_i \geq k; \\ 0, \text{ если } \sum_{i=1}^{n} x_i < k. \end{cases} \tag{6.4}$$

Необходимо заметить, что параллельная и последовательная структуры являются частными случаями структуры «k из n», по-

скольку структура «*n* из *n*», есть последовательная, а «1 из *n*» – параллельная.

Иллюстрацией структуры «2 из 3» может служить рисунок 6.14. Структурная функция имеет в этом случае вид

$$\varphi(x) = (x_1x_2)*(x_1x_3)*(x_2x_3) = x_1x_2x_3 + x_1x_2(1-x_3) + x_1x_3(1-x_2) + x_2x_3(1-x_1).$$

Эту систему в теории надёжности называют ***последовательно-параллельной.***

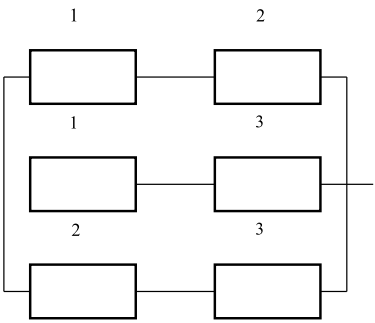


Рис. 6.14 – Структура типа «2 из 3»

Более распространенный другой тип смешанного соединения элементов – *параллельно-последовательная структура* (рис. 6.15), структурная функция которой представляется в виде

$$\varphi(x) = (x_1x_2)x_3(x_4x_5). \qquad (6.5)$$

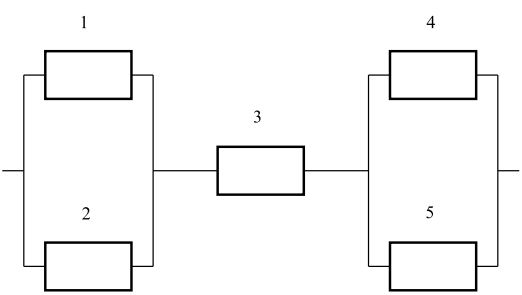


Рис. 6.15 – Параллельно-последовательная структура

Сложные структуры, которые могут быть упрощены путём сведения к простейшей двухполюсной схеме (одному элементу), называются *системами с приводимой структурой* (рис. 6.16).

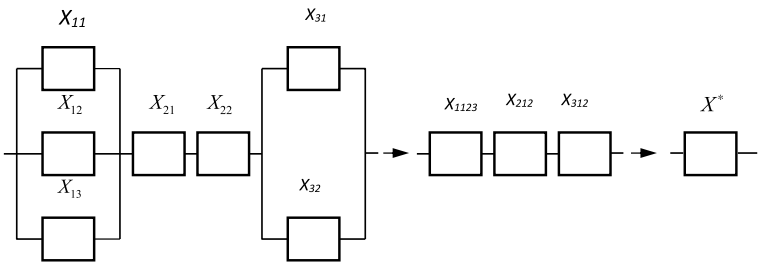


Рис. 6.16 – Схема трансформации системы с приводимой структурой

Система с неприводимой структурой (рис. 6.17) таких преобразований не допускает, поэтому структурный анализ таких систем является более сложным.

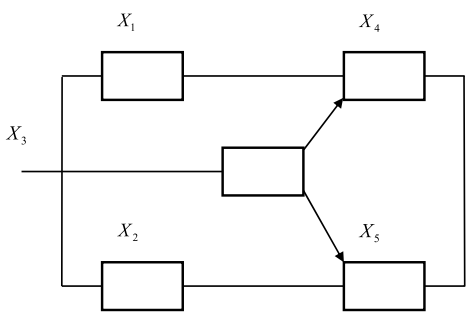


Рис. 6.17 – Система с неприводимой структурой

Представление состояния системы через бинарную функцию $\varphi(x)$, а элементов через булевы переменные x_i позволяет значительно упростить процедуру расчёта безотказности за счёт использования свойств ***поглощения логических переменных.***

В этом случае математическое ожидание случайной величины:

$$x_i = \begin{cases} 1, \text{если i - й элемент находится в работоспособном состоянии;} \\ 0, \text{если i - й элемент находится в неработоспособном состоянии,} \end{cases}$$

есть p_i – показатель безотказности i-го элемента в произвольный момент времени, т. е. $Mx_i = p_i$.

В случае независимости элементов x_i, x_j и x_k:

$$Mx_i x_j x_k = Mx_i \cdot Mx_j \cdot Mx_k = p_i p_j p_k . \qquad (6.6)$$

Аналогичным образом определяется показатель надёжности системы:

$$M\varphi(x) = h(p), \qquad (6.7)$$

где $x=(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ и $p=(p_1, \ldots, p_n)$.

Для определения вероятности безотказной работы с последовательной структурой в произвольный момент времени:

$$h(p) = \prod_{i=1}^{n} p_i . \qquad (6.8)$$

Для системы с параллельной структурой:

$$h(p) = \coprod_{i=1}^{n} p_i \equiv 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - p_i). \qquad (6.9)$$

Для структуры «2 из 3»:

$$h(p) = 1 - (1 - p_1 p_2)(1 - p_1 p_3)(1 - p_2 p_3). \qquad (6.10)$$

В предположении $p_i \equiv p$ система «k из n» имеет функцию надёжности (6.11):

$$h(p) = \sum_{i=1}^{n} C_n^i p^i (1-p)^{n-i}, \qquad (6.11)$$

где $C_n^i = \dfrac{n!}{i!(n-i)!}$ – число сочетаний из n элементов по i.

Нижняя и верхняя оценки вероятности безотказной работы системы:

$$\prod_{i=1}^{n} p_i \le P\{\varphi(x) = 1\} \le \coprod_{i=1}^{n} p_i . \qquad (6.12)$$

Здесь $P\{\varphi(x) = 1\}$ – оператор математического ожидания, примененный к выражению

$$\prod_{i=1}^{n} x_i \le \varphi(x) \le \coprod_{i=1}^{n} x_i , \qquad (6.13)$$

поскольку характеристики любой приводимой системы снизу характеристиками системы с последовательной структурой, а сверху характеристиками системы с параллельной структурой.

6.3. Резервирование в сложных системах

Среди главных инженерных проблем – создание систем с высокими показателями надёжности из ненадёжных элементов путём соответствующей организации избыточности.

Известно, что монотонная избыточная система, состоящая из независимых элементов, имеет *S*-образную зависимость между её безотказностью и безотказностью её наихудшего элемента p (рис. 6.18).

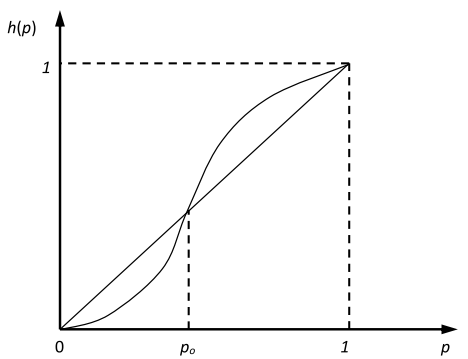


Рис. 6.18 – S-образная функция

Существует такой уровень безотказности p_0 наихудшего элемента системы, при котором безотказность всей системы $h(p)$ оказывается выше $h(p_0)$, т. е. $h(p) > p$, при $p_0 < p < 1$.

Для любой такой системы функция $h(p)$ пересекает диагональ (функцию $h(p) = p$) один раз при $p = p_0$.

Изложенное является логическим обоснованием способа создания избыточности систем – резервирования, изложенного ниже.

При создании и в процессе эксплуатации систем широко распространен способ повышения их безотказности за счёт введения в их конструкции дополнительных элементов, которые могут работать параллельно с основными элементами или подключаться на место от-

казавшего элемента. Таким образом, ***резервированной системой*** называется такая система, в которой отказ наступает только после отказа любого основного элемента и всех его резервных элементов.

Классификация способов резервирования показана на рисунке 6.19.

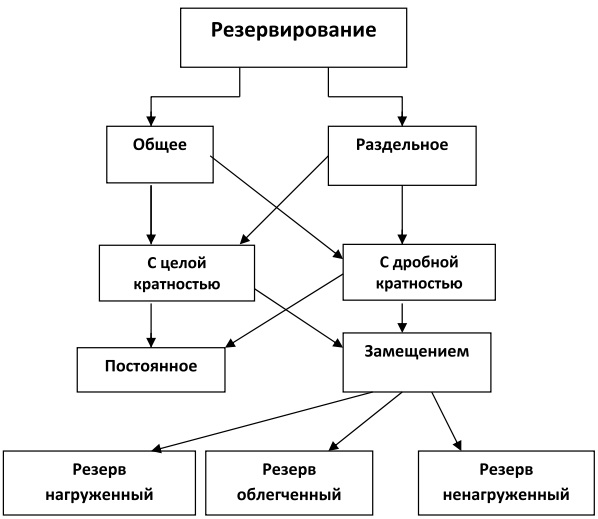


Рис. 6.19 – Способы резервирования

При общем резервировании основной объект (система) резервируется в целом, а при раздельном – резервируются отдельные части (элементы) системы. Под кратностью резервирования «*m*» понимается отношение числа резервных элементов к числу основных.

При резервировании с целой кратностью величина *m* есть целое число (например, если *m* = 2, то на один основной элемент приходится два резервных). При резервировании с дробной кратностью показателем является дробное несокращаемое число. Например, при *m* = 4/2 резервных элементов 4, основных 2, общее число элементов 6. Сокращать дробь нельзя, так как новое отношение может отражать другой конструктивный или физический смысл.

По способу включения резервирование разделяется на постоянное и резервирование замещением. При постоянном резервировании резервные элементы подключены к нагрузке постоянно в течение

всего времени работы и находятся в одинаковых с основными элементами условиях. При резервировании замещением элементы, замещающие основные, подключаются к нагрузке после отказа основных элементов.

Резервирование замещением может быть нагруженным, облегченным и ненагруженным. Достоинством резервирования замещением с ненагруженным резервом является то, что работоспособность резервных элементов сохраняется более длительное время, так как до момента включения они находятся в нерабочем состоянии.

Достоинством постоянного резервирования является его простота, так как в этом случае не требуется никаких переключающих устройств и устройств, отслеживающих процесс снижения работоспособности и сигнализирующих о наступлении отказа.

Систему с общим резервированием с постоянно включённым резервом с целой кратностью отражает схема, изображенная на рисунке 6.20. Здесь параллельно основной цепи включено m резервных цепей, имеющих такие же параметры элементов, как и в основной цепи.

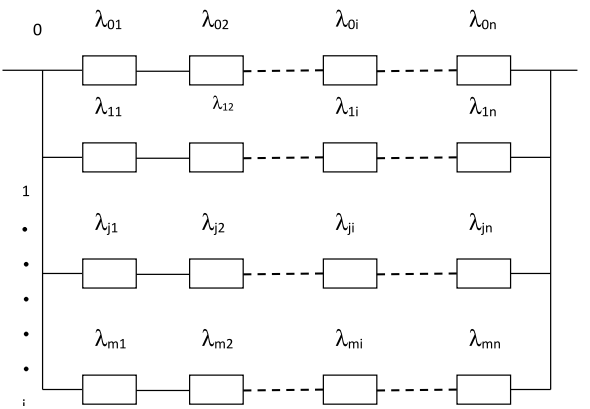


Рис. 6.20 – Схема с общим нагруженным резервированием (количество резервных цепей $0 \le j \le m$)

Анализ приведенной схемы резервирования выполним при следующих допущениях:

– отказы элементов являются случайными и независимыми событиями;

– переключающие устройства идеальны (их безотказность $P(t) = 1$, а основная и резервные цепи равнонадёжны);

– ремонт резервированной системы исключён.

Исходя из принятых допущений для основной и резервных цепей, определим вероятность безотказной работы по формуле

$$P_0(t)=\prod_{i=1}^{n}P_{0i}(t)=\prod_{j=1}^{m}P_{ji}(t)=...=\prod_{i=1}^{n}P_m i\acute{}\,, \qquad (6.14)$$

где $P_{oi}(t)$ – вероятность безотказной работы i-го элемента основной «0» цепи; $P_{ji}(t)$ – вероятность безотказной работы i-го элемента j-й цепи.

Поскольку все одноименные элементы в каждой цепи имеют одинаковые параметры и находятся в одинаковых условиях, то их безотказность в одно и то же время t одинакова. Следовательно, для всей цепи:

$$P_0(t)=P_1(t)=...=P_j(t)=...P_j(t)=...=P_m(t).$$

Соответственно вероятность отказов анализируемых цепей:

$$Q_0(t)=1-P_0(t)=...1-P_j(t)=...-1-P_m(t). \qquad (6.15)$$

Отказ системы наступит, если откажет основная цепь и все резервные. Математически это состояние отражается зависимостью

$$Q(t)=\prod_{j=1}^{m+1}Q_0(t), \qquad (6.16)$$

где $Q_0(t)$ – вероятность отказа основной цепи.

Поскольку все цепи идентичны и находятся в одинаковых условиях, то $Q_0(t)=Q_1(t)=...=Q_j(t)=...=Q_m(t)$, а вероятность отказа системы рассчитывается по формуле

$$Q_0(t)=Q_0(t)^{m+1}. \qquad (6.17)$$

Используя зависимость (6.15), запишем

$$Q(t)=[1-P_0(t)]^{m+1}; \qquad (6.18)$$

$$Q(t)=[1-\prod_{i=1}^{n}P_{0i}(t)]. \qquad (6.19)$$

Резервированная система может находиться в одном из двух полярных состояний – работоспособном, когда хотя бы одна из цепей работоспособна, и неработоспособном, когда отказали все $m + 1$ цепи, т. е. $P(t) + Q(t) = 1$.

В результате получаем, что вероятность безотказной работы системы с количеством цепей $m + 1$ равна

$$P(t) = 1 - [1 - \prod_{i=1}^{n} P_{0i}(t)]^{m+1}. \qquad (6.20)$$

В случае простейшего потока отказов в каждой из цепей (λ_i = const):

$$\prod_{i=1}^{n} P_{0i}(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{\lambda_{0i} t} = e^{\lambda_0 t}. \qquad (6.21)$$

Здесь

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{0i} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ji} = \ldots = \sum_{i=1}^{n} \lambda_m .$$

Тогда вместо выражения (6.20) запишем в виде

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}, \qquad (6.22)$$

где $e^{-\lambda_0 t} = P_0(t)$ – вероятность безотказной работы основной цепи.

Средняя наработка до отказа резервированной системы:

$$T = \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}]dt. \qquad (6.23)$$

Выполнив преобразования, получим

$$T = \frac{1}{\lambda_0} \sum \frac{1}{j+1}; \qquad T = T_0 \sum_{j=0}^{m} \frac{1}{1+j}. \qquad (6.24)$$

Интенсивность отказов системы определяется по зависимости

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot P'(t). \qquad (6.25)$$

Для более наглядного представления выигрыша по критерию безотказности системы при использовании общего нагруженного резервирования с целой кратностью построим график зависимости $P(t) = f\lfloor P_0(t), m \rfloor$ (рис. 6.21).

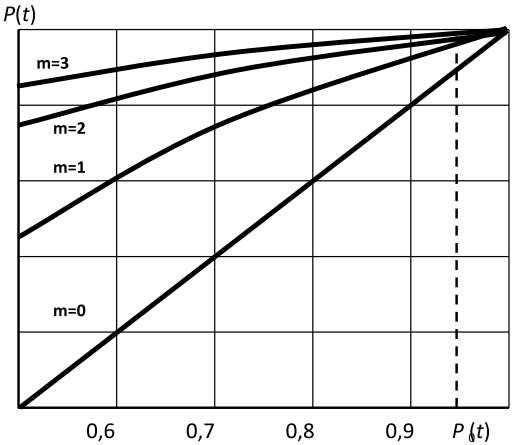


Рис. 6.21 – Повышение вероятности безотказной работы системы при включении m резервных цепей

Из рисунка 6.21 видно, что, если $P_0(t)$ имеет малое значение, например, $P_0(t) < 0{,}8$, то и при $m > 2$ просматривается существенное приращение безотказности.

Однако с увеличением безотказности основной цепи $P_0(t)$ эффективность применения нескольких резервных ветвей снижается. Если безотказность основной цепи $P_0(t) > 0{,}95$, то заметен существенный прирост $P(t)$при включении только одной резервной цепи.

Способ нагруженного дублирования (рис. 6.22). Нагруженное дублирование является частным случаем общего нагруженного резервирования с целой кратностью, $m = 1$, т. е. на одну основную цепь приходится одна резервная цепь, находящаяся под нагрузкой.

Используя зависимость (6.22), определим вероятность безотказной работы системы по формуле

$$P(t)=1-[1-P_0(t)]^2, \qquad (6.26)$$

где $P_0(t)$ – вероятность безотказной работы основной цепи ($P_0(t) = e^{-\lambda_0 t}$).

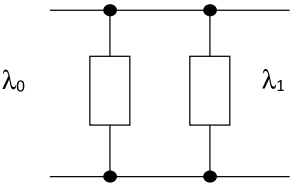


Рис. 6.22 – Расчётная схема нагруженного дублирования
($\lambda_0 = \lambda_1 = \text{const}$)

Используя зависимость (6.23), определим среднюю наработку до отказа системы по формуле

$$T = T_0\left(1+\frac{1}{1+1}\right) = 1{,}5T_0. \qquad (6.27)$$

Подставив в выражение (6.23) исходное выражение (6.26) и его производную, получим выражение

$$\lambda(t) = 2\lambda_0 \frac{(1-e^{-\lambda t})\cdot e^{-\lambda t}}{1-(1-e^{-\lambda t})^2}. \qquad (6.28)$$

Для построения графика $\lambda(t)$ (рис. 6.23) определим предельные значения этой функции:

$$\lambda_{(t=0)} = 0; \quad Lim_{\,t\to\infty}\lambda(t) = \lambda_0.$$

Из рисунка 6.23 видно, что интенсивность отказов системы со временем возрастает. Это говорит о том, что при большом t вероятность отказа одной из цепей высока, и система может перейти в режим работы с одним элементом $\lambda = \lambda_0$. Отметим также начальный этап, на котором система имеет очень высокий уровень безотказности.

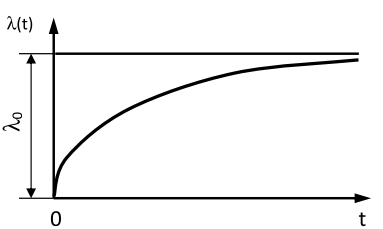


Рис. 6.23 – Интенсивность отказов системы, работающей в режиме нагруженного дублирования

На рисунке 6.24 представлен график функции $P(t)$, построенный по зависимости (6.26). Здесь также приведен график $P_0(t)$ основной цепи (без резерва).

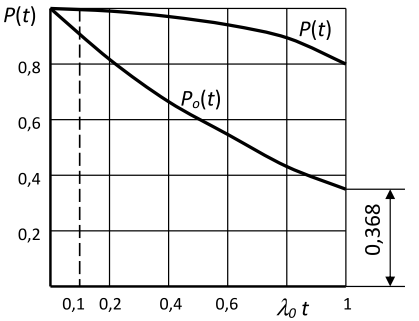


Рис. 6.24 – Зависимость вероятностей безотказной работы основной цепи $P(t)$ и системы из двух элементов $P(t)$ от $\lambda_0 t$

На рисунке 6.24 видна степень повышения безотказности системы, переведенной в режим нагруженного дублирования.

При ***резервировании замещением*** резервные элементы включаются только при отказе основных.

Предположим, что приборы, обнаруживающие отказ основной цепи, и выключатели, отключающие оставшуюся цепь и включающие резервную, также абсолютно надёжны. Резервная ненагруженная цепь, находящаяся в режиме ожидания, своих характеристик не изменяет и работоспособна. Каждая из цепей состоит из n последовательных элементов (рис. 6.25).

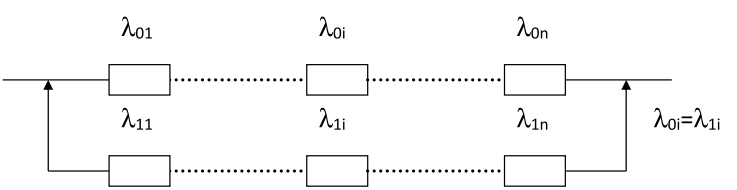


Рис. 6.25 – Схема системы дублирования замещением

Учитывая, что $\lambda_0 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{0i}$; $\lambda_1 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{1i}$; $\lambda_0 = \lambda_1$, анализируемая система (схема) приобретает вид, изображённый на рисунке 6.26.

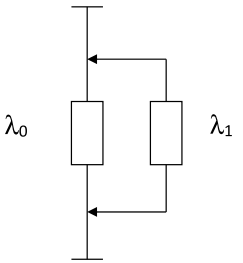


Рис. 6.26 – Расчётная схема
при дублировании замещением

Проанализируем возможные гипотезы, адекватные событиям, которые могут произойти с системой на отрезке времени t.

1. Основная цепь отработала безотказно всё время t, и резервную цепь включать не требовалось. Вероятность этого для системы – $P_0(t)$.

2. Основная цепь отработала только отрезок τ и отказала. При этом сразу же включилась резервная цепь и успешно проработала до конца времени t с вероятностью безотказной работы $P_1(t - \tau)$.

Чтобы работал второй режим, необходимо совпадение двух событий – отказ основной цепи и безотказная работа включенной под нагрузку резервной цепи. Математической оценкой совпадения этих событий является произведение их вероятностей. На рисунке 6.27 изображен график плотности вероятности появления отказа основной цепи $f_0(t)$.

Выделим малый интервал $d\tau$, следующий за отрезком τ. Произведение $f_0(\tau) \cdot d\tau = q_0(d\tau)$. Заштрихованная площадка численно равна вероятности отказа основной цепи на интервале $d\tau$. Выражение $P_1(t - \tau) \cdot f_0(\tau) \cdot d\tau$ представляет собой математическую оценку факта отказа основной цепи и успешного вхождения в работу резервной цепи в момент $(t - \tau)$.

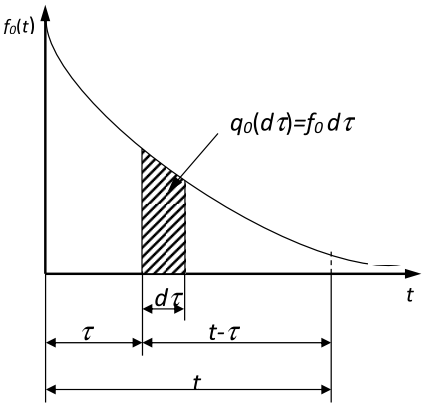


Рис. 6.27 – График функции $\lambda(t)$ системы, дублированной замещением

Вероятность безотказной работы анализируемой системы в течение времени t определяется зависимостью

$$P(t)=P_0(t)+P_{1/0}(t,\tau), \tag{6.29}$$

где $P_{1/0}(t,\ \tau)$ – вероятность безотказной работы цепи «1» в течение времени t при условии, что отказ основной цепи «0» произошел в момент τ (на интервале $\Delta\tau$).

Исходя из условия, что резервная цепь «1» до момента включения работоспособна, а отказ основной цепи с последующим мгновенным включением резервной цепи может произойти в интервале от 0 до t, он рассчитывается по формуле

$$P_{1/0}(t,\tau)=\int_0^t P_1(t-\tau)\cdot f_0(\tau)d\tau. \tag{6.30}$$

Таким образом, учитывая обе гипотезы, на основе формулы полной вероятности запишем выражение вероятности безотказной работы системы в виде формулы

$$P(t)=P_0(t)+\int_0^t P_1(t-\tau)\cdot f_0(\tau)d\tau. \tag{6.31}$$

Зная, что $P_1(t-\tau)=e^{-\lambda_0(t-\tau)}$; $P_0(t)=e^{-\lambda_0 t}$; $f_0(\tau)=-P_0'(\tau)=\lambda_0 e^{-\lambda_0\tau}$, получим формулу

$$P(t)=(1+\lambda_0 t)e^{-\lambda t}, \tag{6.32}$$

$$T=\int_0^\infty P(t)dt=2\frac{1}{\lambda_0}=2T_0. \tag{6.33}$$

Поскольку интенсивность отказов системы $\lambda(t)=-\frac{1}{P(t)}\cdot P'(t)$, то, используя выражение (6.32), после некоторых преобразований получим

$$\lambda(t)=\lambda_0\frac{\lambda_0 t}{1+\lambda_0 t}. \tag{6.34}$$

На рисунке 6.27 и из формулы (6.34) видно, что функция интенсивности отказов монотонно возрастает от $\lambda_{(t=0)} = 0$ до $\lambda_{(t\to\infty)} = \lambda_0$; $\lim_{t\to\infty}\lambda(t)=\lambda_0$.

В первоначальный момент времени интенсивность отказов системы, дублированной замещением, очень низкая $\lambda_0 \gg \lambda_{(t=0)}$. Если такую дублированную систему включить на длительный срок, то выигрыш в безотказности уменьшается. Это легко объясняется тем, что с увеличением времени возрастает вероятность отказа основной цепи. При её отказе вводится в работу резервная цепь с интенсивностью отказов λ_0.

Сравнение графика $\lambda(t)$ для системы нагруженного дублирования (рис. 6.23), и дублирования замещением (рис. 6.27) показывает их схожесть особенно на начальном этапе работы, когда безотказность системы высока. Для сравнения построим график, на котором изображены кривые $P(t)$ системы при различных способах дублирования (рис. 6.28).

На интервале $\lambda_0 t < 0{,}1$ обе схемы (нагруженного дублирования и дублирования замещением) при одних и тех же составляющих элементах по уровню безотказности идентичны. В практических условиях разницу между ними ощутить очень трудно. Так, если средняя наработка до отказа основной цепи $T_0 = 5$ годам и время рабочего

цикла до планового отключения системы составляет t = 0,25 года (один раз в квартал), то $\lambda_0 t = \frac{1}{T_0} \cdot 0,25 = 0,05$ года. При этом вероятность безотказной работы схемы нагруженного дублирования $P_{(0,25)} = 0,9987$, а вероятность безотказной работы схемы дублирования замещением составит $P_{(0,25)} = 0,999$.

В дальнейшем предпочтение следует отдать системе дублирования замещением.

Рассмотрим безотказность системы при ***раздельном резервировании***. Расчётная схема для этого случая изображена на рисунке 6.29.

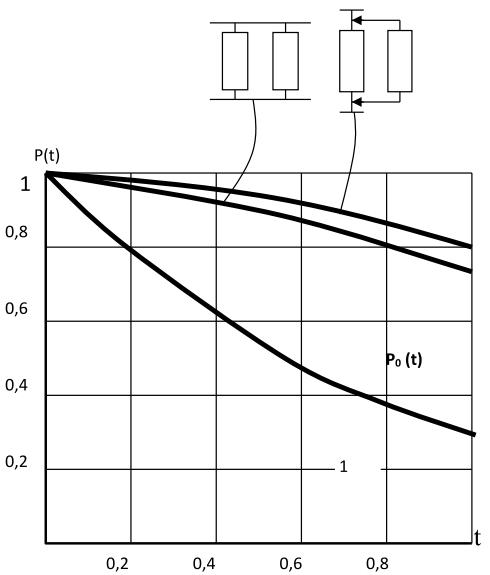


Рис. 6.28 – Безотказность системы
при различных способах дублирования

Отказ этой системы может произойти при отказе любого блока. Совпадение работоспособных состояний n блоков системы гарантирует работоспособное состояние системы. Следовательно, если из-

вестны вероятности безотказной работы каждого из блоков, то вероятность безотказной работы системы выражается формулой

$$P(t) - P_{бл.1}(t)...P_{бл.к}(\text{t})...\text{P}_{\text{бл.n}}(t) = \prod_{k=1}^{n} P_{бл.\text{k}}(t).$$

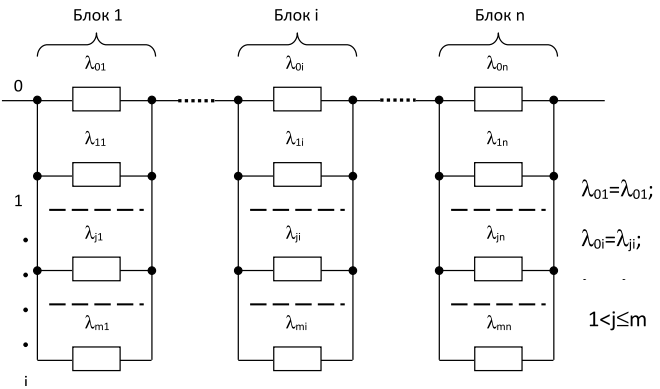


Рис. 6.29 – Расчётная схема надёжности системы раздельным резервированием

Воспользуемся результатом расчётов для случая, показанного на рисунке 6.20. При преобразовании схемы (рис. 6.20) в более удобную (приведенную) вероятность безотказной работы каждой из цепей определяется по формуле (6.14). Для элементов схемы принято:

$$\lambda_0 = \lambda_1 = ... = \lambda_i = ... = \lambda_m = \text{const};$$

$$P_0(t) = 1 - [-(1 - e^{\lambda_0 t})]^{m+1};$$

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{0i}.$$

Сравнивая структуру одного блока схемы по рисункам 6.29 и 6.30, видим, что они идентичны. Следовательно, вероятность работы системы при раздельном резервировании с целой кратностью определится по выражению произведения вероятностей безотказной работы блоков:

$$P(t) = \prod_{k=1}^{n} \{1 - [1 - e^{\lambda_{0k}}]^{m_{k+1}}\}, \qquad (6.35)$$

где λ_{0k} – интенсивность отказов основного элемента k-го блока; выражение в фигурных скобках – вероятность безотказной работы k-го блока.

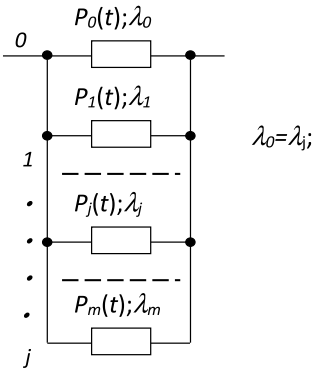


Рис. 6.30 – К определению $P_{бл}(t)$

Среднее время наработки до отказа соответственно определится по выражению

$$T=\int_0^\infty P(t)dt\,.$$

При равнонадёжных элементах и одинаковой кратности их резервирования по всем блокам расчётные выражения оценки важнейших показателей безотказности такой системы примут вид (6.36) и (6.37):

$$P(t)=[1-(1-e^{-\lambda_0 t})^{m+1}]^n\,, \qquad (6.36)$$

где λ_0 = const для всех элементов системы.

$$T=\int_0^\infty P(t)dt=\frac{(n-1)!}{\lambda_0(m+1)}\sum_{j=0}^{m}\frac{1}{y_j(y_j+1)\ldots(y_j+n)-1}, \qquad (6.37)$$

где $y_j=\dfrac{j+1}{m+1}$.

6.4. Основы надёжности эргатических систем

Эргатическая система (***ЭС***) представляет собой сложную систему, включающую в себя одушевлённые и технические звенья. Часто ЭС называют человеко-машинными системами (ЧМС) или системами человек – машина (СЧМ). Объективными причинами постановки проблемы надёжности ЭС и её изучения являются:

– непрерывное повышение уровня сложности технических систем;

– расширение диапазона и одновременное усложнение условий эксплуатации технических объектов;

– повышение требований к минимизации рисков при выполнении техническими объектами и системами технологических функций.

Под системой понимается комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, предназначенный для решения единой задачи. Системы могут быть классифицированы по различным признакам. Одним из них является степень участия человека в работе системы. С этой точки зрения различают автоматические, автоматизированные и неавтоматические системы. Работа автоматической системы осуществляется без участия человека. В неавтоматической системе работа выполняется человеком с применением простых технических устройств. В работе автоматизированной системы принимает участие как человек, так и технические объекты, и такая система – наиболее распространённый вид ЭС.

На практике применяются самые разнообразные виды ЭС. Основой их классификации являются четыре группы признаков: целевое назначение системы, характеристики человеческого звена, тип и структура машинного звена, тип взаимодействия компонентов системы.

Целевое назначение системы оказывает определяющее влияние на многие её характеристики и поэтому является исходным признаком. По целевому назначению можно выделить следующие классы систем:

– *управляющие*, в которых основной задачей человека является управление техническим объектом;

– *обслуживающие*, в которых человек контролирует состояние технического объекта, осуществляет поиск неисправностей, производит наладку, настройку, ремонт и т. п.;

– *обучающие*, предназначенные для формирования и закрепления у человека определённых технологических навыков (технические средства обучения, тренажёры и т. п.);

– *информационные*, обеспечивающие поиск, накопление или получение необходимой для человека информации (компьютерные, телевизионные, документальные системы, системы связи и др.);

– *исследовательские*, используемые при анализе различных явлений, поиске новой информации и др.

Особенность управляющих и обслуживающих систем заключается в том, что объектом целенаправленных воздействий в них является машинный компонент системы. В обучающих и информационных системах объектом воздействия является человек. В исследовательских системах направленность воздействия – и технический объект, и человек.

По признаку характеристики «человеческого звена» можно выделить два класса ЭС:

а) *моносистемы*, в состав которых входят один человек и одно или несколько технических устройств;

б) *полисистемы*, в состав которых входят некоторый коллектив людей и взаимодействующий с ним комплекс технических устройств.

По типу и структуре машинного компонента можно выделить инструментальные системы, в состав которых в качестве технических устройств входят инструменты и приборы. Отличительной особенностью этих систем, как правило, является требование высокой точности выполняемых человеком операций.

Другим типом ЭС являются простейшие человеко-машинные системы, которые включают в себя стационарное и нестационарное техническое устройство (различного рода преобразователи энергии) и человека, использующего это устройство. Здесь требования к человеку существенно различаются в зависимости от типа устройства, его целевого назначения и условий применения. При этом основной особенностью здесь является сравнительная простота функций человека.

Следующим важным типом систем являются сложные ЭС, включающие помимо использующего их человека некоторую необходимую и достаточную совокупность технологически связанных, но различных по своему функциональному назначению технических объектов, предназначенных для производства определённого продукта (комплексы дорожно-строительных, сельскохозяйственных, лес-

ных, боевых и других машин). В этих системах, как правило, связанность технологического процесса обеспечивается локальными системами автоматического управления. В задачу человека входит общий контроль за ходом технологического процесса, изменение режимов работы, оптимизация отдельных процессов, настройка, пуск и остановка.

Ещё более сложным типом ЭС являются системотехнические комплексы с не полностью детерминированными связями и коллективы людей, участвующих в их использовании. Для систем такого типа характерным является взаимодействие не только по цепи «человек – машина», но и по цепи «человек – человек – машина». Другими словами, в процессе своей деятельности человек взаимодействует не только с техническими устройствами, но и с другими людьми. При всей сложности системотехнических комплексов их в большинстве случаев можно представить в виде иерархии более простых ЭС. Типичными примерами системотехнических комплексов различного уровня и назначения могут служить промышленное предприятие, вычислительный центр, транспортная система и др.

Однако, несмотря на большое разнообразие видов ЭС, они имеют целый ряд общих черт и особенностей. Эти системы являются, как правило, динамическими, целеустремленными, самоорганизующимися, адаптивными.

Под надёжностью человека в инженерной психологии подразумевается его способность выполнять требуемые функции с заданной точностью, в пределах заданного интервала времени в конкретных рабочих (штатных) и экстремальных условиях деятельности.

При оценке надёжности человека в системах «человек – техника» учитывается безошибочность и скорость действий человека, а также возможность восстановления его работоспособности. Нередко при оценке показателей надёжности человека применяется «механистический подход», т. е. они определяются аналогично показателям надёжности технических объектов. Однако такая аналогия не всегда корректна, поскольку показатели надёжности человека являются сложными нелинейными функционалами, формируемыми комплексными воздействиями факторов профессиональной пригодности, обученности, тренированности, стрессовой устойчивости, психофизиологического состояния, морально-психологических качеств и социального комфорта.

Основными интегральными показателями, характеризующими результирующие и процессуальные проявления деятельности человека-оператора, являются эффективность и качество деятельности.

Одним из наиболее важных и сложных является вопрос определения критериев надёжности человека и границ их применения. В процессе решения этой задачи предполагается изучение не только задействованных для обеспечения работоспособности ЭС, но и потенциальных качеств человека, анализ его резервных возможностей, изменяющихся в процессе жизнедеятельности. При этом, естественно, возникают проблемы, обусловленные ограниченными возможностями использования аналитических данных и необходимостью учёта динамического взаимодействия ансамбля основных факторов. Только после качественного анализа технологического процесса, выявления его наиболее сложных и уязвимых операций, структурного и детального анализа внешних взаимодействий появляются предпосылки для выполнения количественной оценки надёжности ЭС. При этом для определения надёжности человека-оператора обычно используются следующие критерии: число заданий, выполняемых без ошибок; количество ошибок за определенный промежуток времени или технологический цикл; среднее рабочее время между двумя ошибками; вероятность работы без ошибок в течение определенного промежутка времени или технологического цикла.

Человек занимает особое место в ЭС, поскольку он одновременно олицетворяет собой самое сильное и самое слабое звено ЭС. Ему присущи противоречивые свойства и факторы, имеющие непосредственное отношение к обеспечению надёжности ЭС. Таким образом, обеспечение высокой надёжности работы человека – важнейшее условие повышения качества и эффективности всей ЭС.

Под надёжностью человека-оператора в общем смысле понимают его способность в течение заданного интервала времени в предусмотренных условиях сохранять нормальное состояние жизнедеятельности и выдерживать технические параметры управляемой системы в установленных пределах, а также выполнять все возложенные на него функции по поддержанию заданного режима работы управляемой техники.

На человека в процессе трудовой деятельности действует множество разнообразного рода факторов, влияющих на качество и надёжность выполняемой им работы. Если расположить основные

факторы, действующие на надёжность человека, в виде некой иерархической схемы, то в первом приближении получим схему, представленную на рисунке 6.31.

Большинство ошибок при управлении техникой человеком формируется в пространстве психологических факторов. Говоря о влиянии психологических факторов на безошибочность работы человека-оператора, следует, прежде всего, выделить три аспекта этой проблемы:

– влияние индивидуальных психических качеств;

– влияние текущих психических состояний;

– влияние психических процессов, протекающих при реализации управляющих функций.



Рис. 6.31 – Некоторые факторы, влияющие на надёжность работы человека

Таким образом, психические проявления человека-оператора следует рассматривать в виде некоторого трехслойного образования, где каждый слой в отдельности и все слои вместе определяют психические проявления человека в деятельности и, в частности, формируют его ошибки. Установление причин ошибок усложняется и тем обстоятельством, что указанные слои психических проявлений человека тесно взаимосвязаны и взаимообусловлены. Результатом этого явля-

ется возникновение ошибок в виде запоздалых реакций. Поэтому необходимо констатировать, что наибольшую сложность при выявлении психологических причин ошибок человека-оператора представляет установление психологического слоя, ставшего их первопричиной, а далее – определяющих факторов, которые непосредственно спровоцировали возникновение именно этой ошибки. Такими факторами могут явиться и неудовлетворительный профессиональный отбор, и плохое обучение, и различные физические, социальные факторы, нарушившие стабильность рабочего состояния, и разнообразные внешние помехи, затруднившие процесс управления. Одним из типичных внешних побудителей ошибок оператора является плохое эргономическое согласование внутри ЭС, несоблюдение санитарных норм и др.

Надёжность деятельности человека в ЭС определяется надёжностью организма человека и надёжностью выполнения человеком функций по управлению техническими объектами, в том числе их обслуживанием. В этой связи надёжность человека обычно представляют в двухкомпонентном виде – *структурной и функциональной надёжности*.

Под структурной надёжностью понимают свойство человека сохранять работоспособность в течение заданного времени в определенных условиях.

Функциональная надёжность определяется как свойство человека выполнять предписанные функции в соответствии с заданными требованиями в течение того же времени и в тех же условиях. Эта надёжность для инженерной практики имеет особое значение, поскольку она дает возможность оценить качество деятельности человека в конкретных ЭС.

При анализе процесса выполнения человеком своих функций одним из показателей качества деятельности является количество безошибочно выполненных операций или программность. Поскольку ошибки обусловлены в первую очередь вариабельностью характеристик человека, показатель программности имеет вероятностный характер. При наложении ограничений на число ошибок показатель программности приобретает смысл в аспекте надёжности. Составляющую функциональной надёжности, характеризующую свойство человека выполнять предписанные функции в соответствии с заданной или требуемой программой, называют *функционально-программной надёжностью.*

Так как время выполнения отдельных операций является случайной величиной, то другим показателем качества выполнения функций будет быстродействие.

При наложении ограничений на время выполнения человеком операций показатель своевременности приобретает надёжностный смысл. Составляющую функциональной надёжности, характеризующую свойство человека выполнять предписанные функции в заданные или требуемые интервалы времени, предложено называть *функционально-временной надёжностью.*

Показателем качества деятельности человека является также точность выполнения им предписанных функций. Составляющую функциональной надёжности, характеризующую свойство человека выполнять предписанные функции с заданной или требуемой точностью, называют обычно *функционально-параметрической надёжностью.*

При оценке упомянутых составляющих функциональной надёжности следует исходить из того, что любая деятельность человека в ЭС может быть описана трехуровневой структурой, в которой нижний (первый) уровень формируется операционными единицами, средний (второй) – функциональными единицами и высокий (третий) – программными.

Под *операционной единицей* понимают отдельные психофизиологические акты или их комбинации, являющиеся элементарными единицами, до которых расчленяются действия или деятельность человека (восприятие сигнала, выбор органа управления, нажатие кнопки и т. д.).

Совокупность операционных единиц, представляющая собой в структуре деятельности человека функционально-самостоятельный блок операций, составляет *функциональную единицу*, а группа или комбинация функциональных единиц, объединенных в технологическом или смысловом отношении в законченную программу, составляет *программную единицу*.

При анализе операционных единиц показатели надёжности определяют экспериментально; математические модели на таком уровне рассмотрения деятельности человека не нужны.

Показателями функционально-программной надёжности операционных единиц являются вероятности безошибочного β_1 и ошибочного $\beta^0 = 1 - \beta^1$ выполнения операции, а показателями функционально-временной надёжности операционных единиц – вероятность свое-

временного выполнения операции, т. е. выполнение её за время t, не превышающее предельно допустимое время $\tau : \theta^{1}(\tau) = P\{t \le \tau\}$, и вероятность несвоевременного выполнения операций $\theta^{0}(\tau) = [t - \theta^{1}(\tau)]$.

В качестве предельного закона распределения случайной величины – времени, затрачиваемого на выполнение единицы деятельности, может быть принято гамма-распределение, плотность распределения которого имеет вид

$$f(t) = \begin{cases} 0 \\ \dfrac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} e^{-\beta t} \end{cases}. \qquad (6.38)$$

Параметры распределения выражаются через моменты

$$\alpha = \frac{M^{2}(T)}{D(T)}, \quad \beta = \frac{M(T)}{D(T)}, \qquad (6.39)$$

где α – параметр, определяющий форму кривой распределения; β – масштабный параметр.

При больших значениях параметров α ($\alpha >$ 10–12) в качестве закона распределения времени, затрачиваемого на выполнение единицы деятельности, можно использовать нормальный закон. Таким образом, для определения показателей функционально-временной надёжности исходными параметрами являются математическое ожидание и дисперсия времени выполнения единицы деятельности.

Количественные показатели надёжности человека на уровнях функциональных и программных единиц могут быть получены на основании анализа структуры его деятельности.

Такой анализ реализуют в следующем порядке:

– осуществляют декомпозицию деятельности человека на программные, функциональные и операционные единицы;

– экспериментальным путём определяют надёжностные показатели операционных единиц (безошибочность и время выполнения операций);

– через известные характеристики декомпозированных элементов вычисляют показатели надёжности деятельности на уровне программ.

При декомпозиции деятельности вначале выделяют основные функциональные единицы, представляющие собой блоки операций. При невыполнении или ошибочном выполнении хотя бы одного из блоков операций цель не будет достигнута. Затем выявляют вспомогательные функциональные единицы, т. е. блоки операций, введение которых в структуру деятельности обусловлено требованием увеличения вероятности безошибочного выполнения операций. В таких блоках нет необходимости только при условии идеально надёжной (безошибочной) работы человека и функционирования технических средств.

Сенсорной единицей деятельности называют блок операций, описывающий функционирование человека по восприятию (считыванию) информации с помощью зрительного, слухового и других сенсорных входов.

Моторная единица – блок операций, предусматривающий реализацию механических и речевых воздействий на органы управления, регулировки, юстировки и т. д.

Логическая (*альтернативная*) *единица* представляет собой блок операций, формирующих процесс выбора человеком одной из двух или из нескольких альтернатив на основании анализа информации, отображаемой различными средствами.

Блок операций задержки является функциональной единицей, предусматривающей предписанное инструкциями ожидание человеком момента, с которого он должен начать или продолжить выполнение своего алгоритма. Эта функциональная единица включает операции выдержки, необходимые для «переключения» человека на новый вид деятельности или выполнение новых операций, а также время ожидания, пока произойдёт отработка необходимых функций, входящих в технологический алгоритм технического объекта.

Функциональный контроль включает реализуемые человеком операции по установлению правильности выполнения определенной основной единицы или нескольких основных единиц. В ЭС с одним оператором эта функциональная единица означает контроль оператором своей собственной деятельности, а в ЭС с несколькими взаимодействующими операторами – либо самоконтроль, либо контроль деятельности другого, чаще всего подчиненного, оператора.

Диагностический контроль представляет собой выполняемую специалистом последовательность операций по установлению рабо-

тоспособности технических средств, с которыми этот специалист взаимодействует в данной ЭС.

В основу определения показателей функционально-программной надёжности перечисленных функциональных единиц положены события, характеризующиеся вероятностью появления:

– для рабочих блоков – событие, заключающееся в безошибочном или ошибочном выполнении заданной операции;

– для блоков задержки – событие, заключающееся в соответствии или несоответствии концептуального (внутреннего) отсчёта времени фактическому времени;

– для блоков функционального контроля – событие, заключающееся в установлении факта наличия ошибок в деятельности человека в соответствии с фактическим их наличием;

– для блоков диагностического контроля – событие, заключающееся в установлении факта отказа техники в соответствии с фактическим её состоянием.

Показатели функционально-временной надёжности для различных функциональных единиц следующие:

– для сенсорного и моторного рабочих блоков, блоков решения и задержки показатели аналогичны показателям функционально-временной надёжности выполнения операционных единиц;

– для блока функционального контроля – функция распределения (1) с параметрами:

$$M(T_к)=M(T_п)+M(T_л), \quad D(T_k)=D(T_п)+D(T_л), \qquad (6.40)$$

где $M(T_к)$ – математическое ожидание времени выполнения блока функционального контроля; $M(T_п)$ – математическое ожидание времени выполнения контрольной операции; $M(T_л)$ – математическое ожидание времени выполнения операции логического анализа результатов контроля; $D(T_k)$, $D(T_л)$, $D(T_п)$ – дисперсии времени выполнения соответствующих единиц;

– для блока диагностического контроля – функция распределения (6.38) с параметрами:

$$M(T_Д)=M(T_п)+M(T_л), \quad D(T_Д)=D(T_п)+D(T_л), \qquad (6.41)$$

где $M(T_Д)$ и $D(T_Д)$ – математическое ожидание и дисперсия времени выполнения блока диагностического контроля.

Декомпозиции деятельности на функциональные и операционные единицы должно предшествовать составление алгоритма деятельности в описательной форме с изложением всех действий специалиста и указанием порядка их выполнения в конкретных ситуациях.

Для функционирующей ЭС такой алгоритм составляется на основании инструкций и руководств по эксплуатации, а для проектируемой – на базе предыдущего опыта проектирования и эксплуатации аналогичных ЭС.

При декомпозиции дискретизация деятельности выполняется «сверху вниз», начиная с выделения программных единиц. Далее программные единицы декомпозируются на функциональные единицы, а затем каждая из них представляется в виде совокупности операционных единиц.

Переход от языковой модели процесса (словесного описания) и алгоритма деятельности к формализованной записи завершается составлением структуры деятельности на уровне операционных единиц, для которых могут быть заданы количественные показатели надёжности их выполнения. Если деятельность человека в данной ЭС неясна на уровне операционных единиц, то структура составляется до уровня функциональных единиц в виде совокупности типовых блоков, для которых известны аналитические зависимости для определения их функционально-программной и функционально-временной надёжности.

Если в процессе составления структуры деятельности выявятся блоки операций, не соответствующие формату типовых блоков, то для них характеристики надёжности получают, применяя специальные методики. При этом показатели надёжности деятельности человека будут определяться с использованием модели последовательной схемы – как произведение вероятностей безошибочного выполнения каждого блока. Таким образом, если декомпозиция деятельности производится «сверху вниз», то количественные показатели надёжности определяются «снизу вверх»: сначала экспериментально или на основании справочных данных назначают характеристики выполнения операционных единиц, затем на их основе по аналитическим зависимостям вычисляют характеристики выполнения типовых блоков функциональных единиц, которые в свою очередь являются основой для определения интегрального показателя надёжности всей ЭС.

При анализе выполнения человеком операционных единиц следует учитывать приоритеты «установки на работу», которые могут быть трех видов:

– *на безошибочность деятельности*, когда основным требованием является недопустимость ошибок, а точность и время выполнения второстепенны;

– *на точность деятельности*, когда основным требованием является соблюдение регламентируемой точности, а безошибочность и время выполнения второстепенны;

– *на скорость* (*быстродействие*) *деятельности*, когда основным требованием является достижение результата деятельности за возможно короткое время, а безошибочность и точность второстепенны.

Наиболее распространенной установкой при дискретно-операционном характере действия является установка на безошибочность, а при непрерывно-аналоговом характере действий (например, слежение) – на точность. В ряде задач встречается и установка на быстродействие. В общем случае возможны смешанные установки, а также смена установок в процессе деятельности.

Когда приоритет установки не задан, рекомендуется выбирать установку на безошибочность с последующей проверкой дефицитов времени, и при наличии таковых корректировать результаты с учётом возможности смены установки на скорость.

На основании анализа исполнения регламентированного значения показателя надёжности выполнения программы деятельности специалистов в ЭС принимается решение о её соответствии требованиям в аспекте надёжности человеческого звена.

Проанализируем некоторые факторы (рис. 6.31), формирующие показатели надёжности человеческого звена.

Влияние на деятельность человека эмоциональной напряженности. Изменение режима функционирования ЭС, вызванное отказами её элементов, может привести к повышению эмоциональной напряженности операторов. В зависимости от характера отказа в распоряжении человека-оператора оказываются различные ресурсы времени на реализацию адекватной реакции и восстановление работоспособности системы. Человек-оператор может сравнить период времени t_{no}, необходимый для парирования отказа, с периодом времени t_{ni}, который реально имеется до граничного момента $t_{пн}$. Тогда время

t_{nj} определит ресурс резервной подсистемы при её нештатном использовании в случае отказа основной, а время t_{no} – нормативный период ремонта. При этом в качестве меры дефицита времени на выполнение операций в создавшейся обстановке можно принять отношение или разность:

$$S=\frac{t_{no}}{t_{nj}}, \quad \Delta t = t_{nj} - t_{no} \ . \tag{6.42}$$

Дополнительная напряженность, которая вызывается воздействием на человека-оператора фактора дефицита времени, называется *S*-напряженностью. Этот вид напряженности является одним из факторов, определенным образом влияющих на эффективность операторской деятельности в ЭС любого типа. При этом одним из основных факторов, улучшающих количественные характеристики операторской деятельности в условиях дефицита времени, является мотивация.

Возникающие в результате действия дефицита времени эмоциональные реакции до некоторого порогового значения *M* воздействуют на поведение человека-оператора как организующий фактор. После достижения порога *M* действие эмоциональной напряженности на поведение человека-оператора становится дезорганизующим.

Для определения дефицита времени, возникающего непосредственно перед выполнением *i*-й операции, условимся вместо периода восстановления работоспособности или периода парирования отказа рассматривать среднее время $\overline{T}_i$, необходимое для выполнения оставшейся после возникновения отказа части задания в предположении, что человек-оператор не допустит ни одной ошибки и при этом будет работать в условиях отсутствия эмоционального напряжения. При таких предположениях

$$\overline{T}_i = \sum_{k=i}^{n} \overline{T}_{ok} \ , \tag{6.43}$$

где $\overline{T}_{ok}$ – среднее время выполнения человеком-оператором *k*-й операции при работе без эмоционального напряжения; *i* – текущий номер выполняемой операции; *n* – номер последней операции, которой завершается выполнение задания, в предположении, что при выполнении оставшейся части задания человек-оператор не допустит ни

одной ошибки и что ни одна из последующих операций не будет им переделываться.

Кроме того, условимся вместо периода успешного парирования отказа рассматривать истинное время T_i. Истинным временем T_i, оставшимся для завершения задания, включая i-ю операцию, является разность между временем T, отведенным для выполнения всего задания, и временем $\tilde{T}$, затраченным оператором на выполнение предыдущих операций с учётом всех ошибок, нештатных ситуаций и т. д.:

$$T_i = T - \tilde{T} \ . \tag{6.44}$$

Здесь время $\tilde{T}$ уже нельзя представить суммой $\sum_{k=1}^{i-1} t_k$, поскольку оператор может выполнять задание поэтапно из-за возникающих нештатных ситуаций и переделок отдельных операций. Поэтому в рассматриваемом случае время T_i вычисляют последовательным вычитанием из времени T периодов операций, выполненных оператором перед началом реализации i-й операции в соответствии с алгоритмом операторской деятельности и с учётом влияния эмоциогенных факторов. Тогда количественная мера дефицита времени, возникшего непосредственно перед выполнением i-й операции, будет определяться отношением

$$S_i = \frac{\tilde{T}_i}{T_i} . \tag{6.45}$$

Мотивация действует в течение больших промежутков времени деятельности оператора и изменяется лишь при изменении конечной цели или условий работы. Такое изменение происходит, например, при возникновении нештатной ситуации, когда человек-оператор вынужден решать задачу выживания, предотвращения угрозы в отношении других людей, либо продолжать выполнение задания с прежней целью, но уже в условиях отказов элементов ЭС, требующих применения новой модели поведения.

Эмоциональная напряженность S_i, непосредственно перед выполнением i-й операции зависит от дефицита времени S_i следующим образом:

а) если $S_i = \overline{T}_i / T_i \le 1$, то проверяется, достаточно ли оставшегося времени для выполнения только существенных операций, т. е. проверяется условие $\overline{T_i^c} / T_i \le 1$, где $\overline{T}_i^c$ – среднее время, необходимое для

реализации только существенных операций при работе без эмоциональной напряженности и условии, что оператор при этом не допустит ни одной ошибки.

$\overline{T}_i^c$ определяется путём суммирования априорных математических ожиданий времени реализации лишь существенных операций:

$$\overline{T}_i^c = \sum_k \bar{t}_{ok}^c \; ; \qquad (6.46)$$

б) если $S_i = \overline{T}_i / T^c \le 1$, то времени для выполнения оставшихся операций, как существенных, так и несущественных, достаточно, и оператор реализует все оставшиеся операции без эмоциональной напряженности. Величина S_i принимается равной единице. Выполняются все операции;

в) если $S_i = \overline{T}_i / T_i \le 1$, но $\overline{T_i^c} / T_i \le 1$, то времени для реализаций только существенных операций достаточно, и оператор выполняет оставшиеся существенные операции без эмоциональной напряженности. Величина S_i принимается равной единице. Выполняются только существенные операции;

г) если $S_i = \overline{T}_i / T_i \le 1$ и $\overline{T_i^c} / T_i \le 1$, то времени для реализаций даже существенных операций недостаточно, поэтому оператор действует с эмоциональной напряженностью. Величина S_i принимается равной отношению $\overline{T_i^c} / T_i$. Выполняются только существенные операции.

Теперь, когда количественной мере дефицита времени S_i поставлена в соответствие количественная мера эмоциональной напряженности S_i, можно перейти к построению математической модели влияния эмоциональной напряженности на количественные характеристики операторской деятельности на основе проведенного эксперимента.

Типовые графики зависимостей временных характеристик операторской деятельности, т. е. графики зависимости среднего времени выполнения i-й операции $\bar{t}_{io}$ и среднего квадратического отклонения времени выполнения i-й операции σ_{io} от напряженности S_i, приведены на рисунке 6.32*а* и *б* соответственно.

При проведении каждого конкретного исследования аналогичные графики должны быть получены экспериментальным путём при

минимальной заинтересованности человека-оператора в выполнении заданной ему работы (коэффициент мотивации $F = 0$).

Указанные графики строятся по трём точкам: $M_н$ – граница нормальной напряженности; $M_{кр}$ – критическая напряженность, превышение которой приводит к снижению работоспособности; $M_{ап}$ – напряженность, при которой наступает апатия.

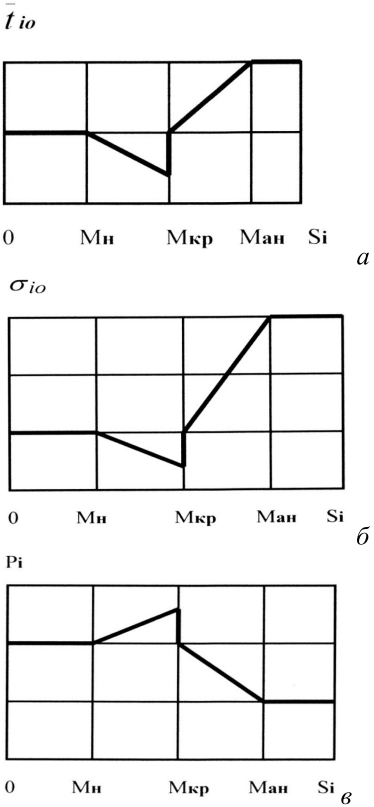


Рис. 6.32 – Обобщенные зависимости показателей деятельности человека от его эмоциональной напряженности S_i:
а – среднее время $\bar{t}_{io}$ выполнения *i*-й операции; *б* – среднее квадратичное отклонение времени выполнения *i*-й операции; *в* – зависимость безошибочного выполнения *i*-й операции.

На участках $0 \le S_i \le M_н$ и $S_i > M_{an}$ значения $\bar{t}_{io}$ и σ_{io} принимаются постоянными; на участке $M_{кр} \le S_i \le M_{an}$ – линейно изменяющимися, а на участке $M_н \le S_i \le M_{кр}$ – обратно пропорциональными S_i, изменяющимися нелинейно.

При коэффициенте мотивации, отличном от единицы, величины $\bar{t}_i$ и σ_i рассчитываются по формулам

$$\bar{t}_i = \frac{t_{io}}{1+F}, \quad \sigma_i = \frac{\sigma_{io}}{1+F}. \tag{6.47}$$

Организующее влияние эмоциональной напряженности сказывается в том, что оператор работает собраннее, точнее, и вероятность правильного и своевременного выполнения операций повышается. При пороговом значении эмоционального напряжения вероятность правильного выполнения операции принимается равной единице. При значении дефицита времени $S_i < 1$ напряженность $S_i = M_н$ и не влияет на вероятностные характеристики деятельности человека-оператора. Таким образом, во всей области организующего влияния эмоциогенных факторов эмоциональная напряженность изменяется в пределах $M_н \le S_i \le M_{кр}$. Вероятность правильного выполнения операции линейно возрастает и становится равной единице, когда эмоциональная напряженность достигает порогового значения, равного $M_{кр}$.

Аппроксимация зависимостей $p_i(S_i)$, описывающих влияние эмоциональной напряженности S_i на вероятность p_i правильного выполнения i-й операции и полученных при имитации деятельности человека-оператора, приводит к следующим выражениям. Для $S_i \le M_{кр}$ это выражение будет иметь вид

$$p_i = p_{oi} + \frac{(1 - p_{oi})(S_i - M_н)}{M_{кр} - M_н}, \tag{6.48}$$

где p_{oi} – вероятность того, что при отсутствии эмоциональной напряженности оператор выполнит i-ю операцию правильно и своевременно.

Область дезорганизующего влияния эмоциональной напряженности при $S_i > M_{an}$ разбивается на две части. При $S_i > M_{an}$ дальнейше-

го ухудшения вероятностных характеристик не происходит. При этом выполняется равенство

$$p_i = p_{oi} - (1 - p_{oi}) = 2p_{oi} - 1. \qquad (6.49)$$

Вероятность правильного выполнения операции по сравнению с априорной вероятностью уменьшается на 1 – p_{oi}, а в области $M_{кр} \le S_i \le M_{an}$ изменяется линейно:

$$p_i = p_{oi}\left[(S_i + M_н - M_{кр}) + (M_{кр} - S_i)\right]. \qquad (6.50)$$

Эти формулы применимы для операций, вероятность правильного выполнения которых превышает 0,5.

В приведенных формулах отсутствует коэффициент F, и поэтому можно сделать ошибочный вывод, что влияние мотивации не учитывается. Однако мотивация влияет на численное значение порога $M_{кр}$, изменяя угол наклона прямой, отражающей зависимость $p_i(S_i)$ как в области $M_н \le S_i \le M_{кр}$, так и в области $M_{кр} \le S_i \le M_{an}$.

Типовая зависимость вероятности $p(T)$ выполнения человеком-оператором работы от представленного ему на реализацию этой работы времени приведена на рисунке 6.33. Здесь отмечены три области: область 1 значений функции $p(T)$, в которой дефицит времени отсутствует; область 2, в которой дефицит времени действует организующе; область 3, для которой дефицит времени является дезорганизующим фактором.

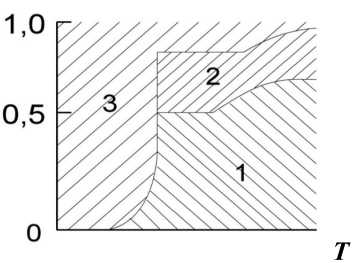


Рис. 6.33 – Зависимость вероятности выполнения работы человеком-оператором от предоставленного для реализации этой работы времени

Если теперь объединить все сказанное об эмоциональных проявлениях оператора в связи с решением задач управления, то легко заметить наличие цепи взаимосвязанных факторов, образующих схему саморегуляции (рис. 6.34).

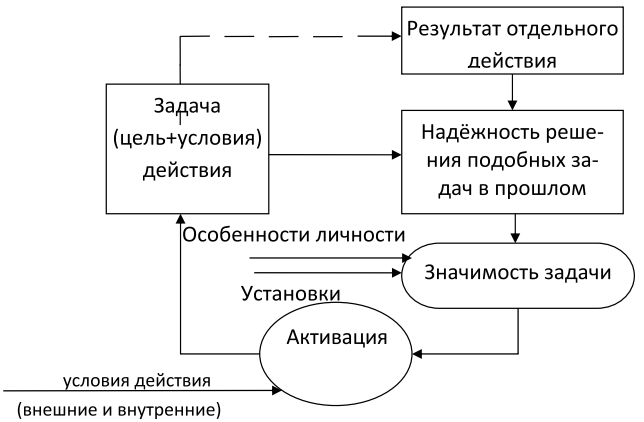


Рис. 6.34 – Блок-схема саморегуляции предметного действия в сфере энергетических процессов

Возникшая у оператора задача невольно соотносится им с представлением о том, как в прошлом и насколько надёжно решались им подобные задачи. Исходя из такого соотнесения формируется его отношение к задаче – степень её значимости-тревожности. Чем более значимой представляется для оператора данная задача, тем более высокий уровень активации она порождает в его нервной системе, тем большей энергетической мобилизацией встречает его организм эту задачу, что в свою очередь способствует более успешному её решению, т. е. здесь мы имеем дело со схемой саморегуляции, действующей с отрицательной обратной связью.

Также важно отметить, что активация нервной системы и энергетическая мобилизация организма возникают непроизвольно: достаточно оператору осознать сложность и ответственность задачи, чтобы в его организме возникло состояние готовности к преодолению ожидаемых трудностей и опасностей (при условии, что оператор в целом способен решить такую задачу). Поэтому нецелесообразно перед выполнением ответственных заданий давать беспредметные наставле-

ния оператору – «будь внимателен», «будь осторожен», поскольку в этом случае инструктор ориентирует его на создание произвольного внимания, на волевую активацию нервной системы. Произвольное внимание же, как известно, требует от человека значительных энергетических затрат, а поддержание произвольного внимания в течение длительного времени имеет итогом состояние существенного утомления, которое нивелирует достижения, полученные в результате волевых усилий оператора.

В связи с этим в качестве важнейшего условия надёжной работы человека-оператора можно выделить его способность адекватно оценивать значимость-тревожность возникающих задач.

Действие внутренней саморегуляции в сфере психоэнергетических процессов хорошо иллюстрируется известной в психологии кривой Иеркса – Додсона, связывающей продуктивность действий с активацией организма (рис. 6.35).

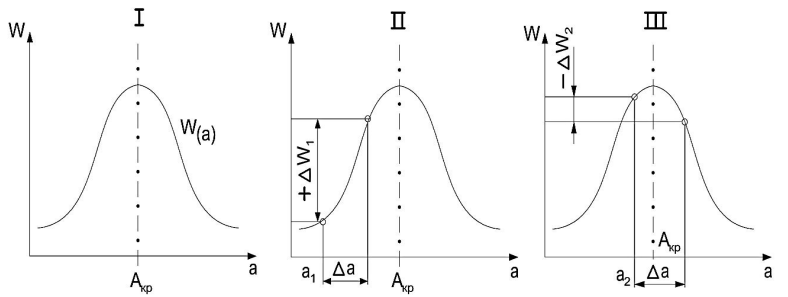


Рис. 6.35 – Закон Иеркса – Додсона, связывающий активацию нервной системы с продуктивностью действий:
I – общий вид распределения Иеркса – Додсона; *II* – приращение активации Δa ведет к приросту продуктивности ΔW_1; *III* – такое же приращение активации Δa ведет к снижению продуктивности ΔW_2.

Внимание. Одним из главных показателей, определяющих способность человека-оператора к безошибочной работе, является качество его внимания. Под вниманием понимают способность к концентрации сознания на определенном объекте при одновременной отстройке от всех прочих объектов. Способность устойчиво концентрироваться на решаемой задаче и в то же время не реагировать на всякого рода шумы особенно важна для оператора.

Известно, что психологическая наука представляет систему восприятия человека в виде одноканальной системы. В системе восприятия действуют своего рода аттенюаторы (регуляторы), которые, например, усиливают слуховое восприятие, ослабляя при этом зрительное, или наоборот, при этом человек вынужден распределять внимание между зрительными и слуховыми сигналами. В процессе работы оператора, когда приходится постоянно держать под контролем большое количество параметров управляемой системы, распределение внимания приобретает первостепенное значение. Необходимо констатировать, что способность к распределению и концентрации внимания является устойчивым показателем человека, вытекающим из особенностей его нервной системы.

Эмоциональная устойчивость характеризует способность субъекта сохранять достаточное самообладание и работоспособность при воздействиях на него различных эмоциогенных факторов высокой значимости, связанных с его жизнью, её условиями. Она проявляется в сдержанных эмоциональных реакциях на указанные дестабилизирующие факторы с сохранением управления и контроля за своим поведением и в способности адаптироваться, приспосабливаться к подобным воздействиям.

Эмоциональная устойчивость вытекает из таких психофизиологических свойств, как эмоциональная возбудимость, неустойчивость нервной системы, и в то же время она решающим образом обусловлена волевыми качествами субъекта. Первые из них являются свойствами темперамента, поэтому и эмоциональную устойчивость можно расценивать как его производную. Влияние эмоциональной устойчивости на безошибочность и безопасность работы операторов было подтверждено многими экспериментальными исследованиями. Например, установлено, что в процессе ДТП под влиянием эмоциогенных факторов резко понижается надёжность работы водителя, что возникающая под их воздействием высокая напряженность сопровождается нарушениями в работе сердечно-сосудистой системы, что приводит к невыполнению или неверному выполнению важнейших действий по предотвращению ДТП.

Измерение эмоциональной устойчивости осуществляется на специально созданных установках, где испытуемым поручают решение разного рода задач (часто математических) в постоянно возрастающем темпе, доведенном до такого уровня, когда человек уже физически неспособен с ними справляться. При этом эмоционально неустойчи-

вые испытуемые в таких случаях впадают в панику, а устойчивые прекращают решение очередной задачи.

Сенсомоторная координация. Важным показателем способности оператора к безошибочной работе является его сенсомоторная координация. Под сенсомоторной координацией понимают динамическую взаимосвязь между воспринимаемыми сигналами и адекватными двигательными реакциями на них. В этой приоритетным фактором является восприятие сигналов, отражающих возникшую ситуацию; двигательный же ответ на них является, как правило, автоматизированным актом. Сенсомоторная координация является особенно ценным профессиональным качеством в деятельности операторов, управляющих транспортными средствами, т. е. фактически выполняющих функции мониторинга заданных характеристик движения. Экспериментально доказано, что водители автомобилей с плохой сенсомоторной координацией попадают в аварийные ситуации в два раза чаще, чем водители, у которых этот показатель находится на приемлемом уровне.

Состояние здоровья. При оценке состояния здоровья в данном случае имеют в виду не наличие простудных или инфекционных заболеваний, при которых работники обычно не допускаются к работе, а определённых хронических заболеваний, при которых человек признаётся трудоспособным, однако его функциональные возможности оказываются существенно сниженными. К таким заболеваниям в первую очередь относят сердечно-сосудистые, желудочно-кишечные заболевания, диабет, которые провоцируют недомогание, слабость, быструю утомляемость, повышенную раздражительность. Чтобы в таком состоянии работать без ошибок, требуется высокое внимание, вызывающее напряженность и ещё большее развитие утомления, которое приходится компенсировать соответственно ещё более высоким уровнем внимания. Создаются механизмы саморегуляции, которые действуют только за счёт непрерывного роста напряженности труда оператора, что обуславливает появление дополнительных ошибок. Установлено, что операторы, страдающие подобными заболеваниями, на 10–33% чаще допускают различного рода ошибки и нарушения, чем здоровые.

Немало ошибок связано с недостатками органов чувств и чаще всего со зрением и слухом операторов.

Необходимо особо отметить, что не только сами заболевания, но и средства их лечения могут являться причинами появления дополнительных ошибок операторов и связанных с ними происшествий. Многие из лекарств оказывают воздействие как на физиологические, так и

на психические функции человека. Они не только понижают концентрацию внимания, готовность к действиям в экстренных ситуациях, нарушают координацию движения, создают состояние общей вялости, но и влияют на ряд психических качеств субъекта. Например, лекарства, стимулирующие центральную нервную систему, могут вызывать нарушение волевой регуляции, повышение агрессивности, склонность к риску, а также неадекватность восприятия сложившейся ситуации. Болеутоляющие, жаропонижающие и противовоспалительные средства могут понижать зрительные функции оператора. Необходимо обратить внимание и на опасность сочетания различных лекарственных средств и их бессистемное использование при самолечении, что может не только резко ухудшить текущее состояние человека, но и вызвать в его организме необратимые негативные сдвиги.

Алкогольное опьянение существенным образом определяет состояние оператора и его склонность к совершению ошибок. При рассмотрении данного вопроса следует придать решающее значение вопросу самооценки человеком его состояния в зависимости от степени опьянения. В большинстве случаев люди достаточно объективно оценивают уровень своего опьянения, но их оценка влияния уровня своего опьянения на собственные функциональные возможности оценивается ими гораздо менее адекватно. Это вполне естественно, поскольку процессы снижения ощущения опьянения и восстановления нормальных функциональных возможностей организма протекают неравномерно, непараллельно. Установлено, что если через 3 ч после употребления алкоголя чувство опьянения уже существенно угасает, то объективные показатели функциональных возможностей организма ещё остаются весьма низкими.

Однако существуют и некоторые другие причины, способствующие неадекватным оценкам людьми собственных возможностей в состоянии опьянения. Некоторые СМИ и некомпетентные «эксперты» внушают людям, что главное зло опьянения заключается в понижении физиологических возможностей человека, зависящем только от количества и крепкости выпитого. Эта информация создаёт ложные ориентиры: человек рассуждает, что, если он выпьет немного спиртного, то его возможности снизятся настолько незначительно, что этим обстоятельством можно просто пренебречь. Практика же показывает, что большинство ошибок и нарушений оказываются связанными именно с легким опьянением человека.

Объяснение этому кажущемуся противоречию можно найти, если учесть, что алкоголь, кроме физиологического, оказывает и психологическое воздействие на человека. Чтобы это показать, воспользуемся графической интерпретацией этого тезиса (рис. 6.36).

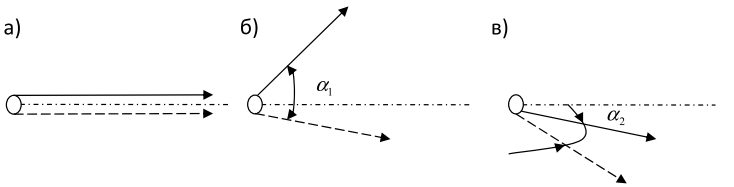


Рис. 6.36 – К вопросу о влиянии алкоголя на адекватность самооценки субъектом своих возможностей:
——▶ – самооценка; – – –▶ – фактические возможности;
а – в трезвом состоянии; *б* – при легком опьянении;
в – при среднем опьянении.

На этом рисунке изображены три диаграммы, каждая из которых состоит из двух векторов, символизирующих фактические возможности субъекта по решению возникшей задачи и его оценку своих возможностей.

Диаграмма *а* построена для случая, когда человек трезв и его самооценка адекватна фактическим возможностям. Диаграмма *б* соответствует состоянию легкого опьянения субъекта: здесь его реальный функциональный потенциал заметно снижается, но он этого не ощущает. Однако за счёт тонизирующего воздействия небольшой дозы алкоголя у него возникает дополнительная активация нервной системы, он начинает верить в свои возросшие возможности, его оценка своих возможностей существенно возрастает. При этом, как видно из диаграммы, возникает большое рассогласование (угол α_1) между тем, что фактически может человек, и тем, каким он себя считает.

Иными словами, создается недооценка значимости возникающих задач, что влечёт за собой недоиспользование своих возможностей, внешних и внутренних ресурсов для решения текущих задач со всеми вытекающими отсюда последствиями.

На диаграмме *в* представлен случай среднего опьянения субъекта. Как из неё видно, реальные возможности субъекта значительно снижаются, но он это чувствует и осознает. Поэтому и его самооцен-

ка собственных возможностей тоже падает, и рассогласование между векторами (угол α_2) получается уже не столь значительным, как при лёгком опьянении. Осознание значимости сложившейся ситуации влечёт за собой включение описанных выше механизмов саморегуляции, способствующих решению и этой задачи. Однако в данном случае этого может и не произойти, поскольку сильное алкогольное опьянение будет нарушать действие физиологических механизмов саморегуляции, и они перестанут давать должный эффект.

Курение. Наряду с опасностью употребления алкоголя, можно выделить ещё одну вредную привычку, негативно влияющую на состояние человека-оператора и на надёжность ЭС в целом, – курение. Известно, что курят около 50% людей. При этом существует мнение, что выкуренная сигарета позволяет человеку снизить уровень волнения и возбуждения, следовательно, снижается опасность совершения ошибок. В известной степени это имеет место, поскольку затяжка табачным дымом действует на человека успокаивающе. Однако нельзя забывать, что табачный дым является наркотическим средством, вызывающим расслабление и снижение концентрации внимания, уменьшающим чувства осторожности и критичности самооценки. К тому же курение является деградационным процессом, ухудшающим зрение, сенсомоторные реакции, снижает умственную работоспособность.

Даже если отвлечься от названных психофизиологических изменений, вызываемых курением, то нельзя не учитывать, что и в поведенческом аспекте курение мешает работе, например, водителя автомобиля. Все его действия, связанные с курением – доставание сигареты и зажигалки, прикуривание, частые взгляды на сигарету, чтобы вовремя сбросить пепел, прищуривание глаз от табачного дыма, – естественно, отвлекают водителя от управления автомобилем.

Со всей очевидностью необходимо констатировать, что отрицательное воздействие курения на состояние человека с точки зрения безошибочности его работы превалирует над теми незначительными достоинствами, которые оно имеет.

Возраст. Влияние возраста человека на надёжность ЭС рассмотрим на примере безопасности работы машиниста локомотива.

Изменение возраста машиниста определяет две тенденции, влияющие на качество вождения поезда. Будем оценивать их по относительному числу происшествий $n_{отн}$, представляющему собой отношение количества дорожных происшествий к пути, пройденному локомотивом за определённый срок, например за один рейс.

Одна из тенденций заключается в констатации того, что неопытность и азарт молодого машиниста часто приводят к увеличению числа ошибок. При этом следует отметить, что количество ошибок снижается по мере накопления опыта, т. е. увеличения параметра – возраста машиниста (кривая *1*, рис. 6.37).

Другая тенденция состоит в возможности молодых машинистов принимать решения (латентный период) и реализовать их (моторный период) в более короткие сроки. Это объясняется возможностью быстро принимать и обрабатывать информацию по дорожной ситуации и способностью к быстрым действиям. С увеличением возраста машиниста с некоторого момента моторный период начинает возрастать, и накопленный за годы опыт вождения перестаёт компенсировать этот рост (кривая *2*). Возрастная характеристика машинистов – суммарная кривая *3* имеет чётко выраженные минимум и максимум при малом и значительном возрасте машиниста.

На возрастной характеристике машинистов можно выделить следующие характерные точки: A, D – максимум ошибок и нарушений и O – минимум ошибок и нарушений; кроме того, точки B и C определяют границы приемлемого уровня ошибок по сравнению с минимальным.

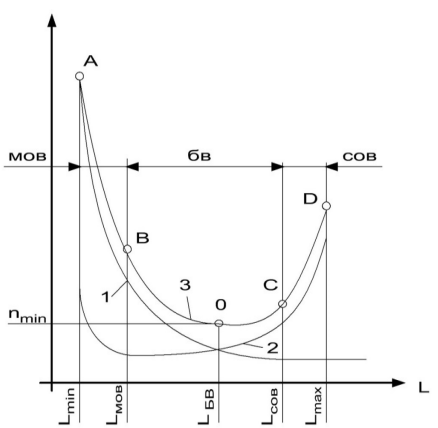


Рис. 6.37 – Возрастные характеристики машинистов локомотивов: МОВ – младший опасный возраст; БВ – безопасный возраст; СОВ – старший опасный возраст; *1* – кривая накопления опыта вождения; *2* – кривая моторного периода; *3* – суммарная кривая.

Возрастная характеристика позволяет определить не только возрастные интервалы «безопасного оператора», но и коэффициенты опасности, показывающие, во сколько раз увеличивается число ошибок при том или ином возрасте машиниста (например, n_A или n_D) по сравнению с лучшими для них показателями ($n_{\min}$).

На возрастной характеристике машинистов выделим три интервала: младший опасный возраст $L_{MOB} - L_{\min}$, характеризуемый коэффициентом опасности, соответствующим точке А; $k_{MOB} = \frac{n_A}{n_{\min}}$; «безопасный возраст» $L_{COB} - L_{MOB}$, характеризуемый минимумом числа ошибок $n_{\min}$; старший опасный возраст $L_{\max} - L_{COB}$, характеризуемый коэффициентом опасности, соответствующим точке D:

$$k_{COB} = \frac{n_D}{n_{\min}}.$$

Характерные точки рассмотренных возрастных характеристик дают общее статистическое представление о влиянии возраста на работу машиниста локомотива, не передавая большинства индивидуальных особенностей субъекта.

На надёжность ЭС существенное влияние оказывает ***среда***. Различают внешнюю среду, в которой пребывает ЭС, например состояние дороги, и внутреннюю среду – среду пребывания людей, например, в кабине автомобиля, центре диспетчерского управления и т. п.

В идеальном варианте среда предназначена обеспечивать оператору высокий уровень работоспособности. В большинстве случаев у оператора отсутствует прямая возможность воздействия на параметры внешней среды, поэтому полагают, что основные усилия следует направлять на улучшение параметров внутренней среды: микроклимата, состава воздуха в помещении, показателей вибрации и шума и др. Следует анализировать и учитывать совокупности параметров внутренней среды, проявляющихся в различных сочетаниях. Основными особенностями деятельности человека-оператора, подчеркивающими важность факторов среды, являются:

– субъект труда – человек-оператор находится не непосредственно у объекта труда, а контроль и управление объектом осу-

ществляются с помощью органов управления и использования его информационной модели;

– в процессе управления человеку-оператору приходится решать задачи, возникновения которых нельзя предвидеть.

Обеспечение надёжности системы «человек – машина» является главной задачей инженерной психологии, и при этом уже не подвергается сомнению, что определяющее значение имеет надёжность человека-оператора. Ключевой эргатический фактор состоит в том, что, управляя современными техническими системами, оператор постоянно взаимодействует не с управляемыми объектами, а с их информационными моделями.

Недостатки, препятствующие человеку быть идеальным оператором, хорошо известны: недостаточная скорость и точность выполнения операций, быстрая утомляемость, подверженность влиянию разнообразных субъективных факторов. Однако возможности человека, связанные с огромной интеллектуально-психологической пластичностью и самокомпенсацией, способностью творчески изменять схемы действий, избирательной самообоучаемостью и интуицией, дают ему те преимущества, которые вряд ли будут достигнуты техническими системами в обозримом будущем. Более того, совершенствование автоматизации управления не только не приводит к исключению человека из управленческих процессов, но, напротив, к усложнению его труда, обусловленному значительным повышением интеллектуальных и социальных факторов в процессе управления и других процессах, связанных с технологическим назначением ЭС.

Профессиональное мастерство человека-оператора оказывает заметное, а порой и решающее влияние на надёжность управляемого технического объекта и ЭС в целом. Несомненно, эффективный по обеспечению надёжности стиль управления во многом формируется путём оптимально-целевой организации профессионального обучения и переподготовки. В рамках эргатических концепций выделяют следующие этапы процедуры обучения:

– первоначальная «приработка» человека к режиму работы в составе конкретной ЭС; на этом этапе формируется структура деятельности обучаемого;

– отработка параметров структуры, в пределах которых обучаемый узнаёт, какие операции и в какой последовательности следует выполнять, приобретает соответствующие умения, но действия его недостаточно точны и своевременны;

– достижение статистически стабильного уровня сформированных в процессе обучения умений и навыков путём тренировок;

– формирование устойчивых навыков дополнительными циклами обучения.

Вероятность наступления события «ошибка управления» в пределах предложенной классификации циклов обучения (формирования профессиональной готовности оператора) может отличаться в 6–10 раз. Попытки выделить значимые профессиональные качества, необходимые, например, хорошему водителю, привели к составлению перечня из 50 наименований, что, казалось бы, предполагает очень большой разброс профессиональных характеристик у разных людей. В действительности этого не происходит, поскольку обучение и последующее накопление профессионального опыта не только улучшает показатели качества работы, но и уменьшает их рассеивание.

Все большее значение придается проблеме моральной надёжности личности, занимающей сегодня видное место в инженерно-психологических исследованиях. Степень личной ответственности человека, определяющая её надёжность, с учётом его индивидуальных особенностей и обстоятельств личной жизни, во многом зависит от социальной и нравственной атмосферы общества, вызывая ощущения уверенности или неудовлетворенности, нужности или ненужности. Определенные сочетания этих факторов могут являться причиной управленческих действий оператора, направленных на нецелевое использование объекта управления, вплоть до его использования как орудия уничтожения. Моральная надёжность человека, неотделимая от моральной ответственности, охватывает всю совокупность человеческих проявлений и прямо зависит от моральной надёжности общества – его устройства, идеалов и устремлений, политики.

Таким образом, формирование «профессионального портрета» человека-оператора в контексте положений, формирующих «технологический портрет» современных ЭС, должно осуществляться с обязательным учётом следующих требований к надёжности человека:

– профессиональная пригодность в контексте требований, предъявляемых к антропологическим и психофизиологическим показателям субъекта;

– профессиональная пригодность в контексте требований, предъявляемых к наличию и составу минимально достаточного набора знаний, умений и навыков; наличие необходимого базового образования;

– способность к анализу своей деятельности, обобщению накапливаемых знаний, наблюдений, опыта;

– стремление к приобретению дополнительных знаний, умений и навыков в процессах обучения и самообучения;

– способность запоминать, сохранять и воспроизводить не только дополнительную информацию, но и вновь приобретенные навыки до уровня инстинктивных действий, рефлексов, подсознательной деятельности;

– адаптация к различным условиям деятельности, состояниям элементов ЭС; убеждённое отторжение опасной разновидности адаптации – привыкания к опасности, притупления бдительности;

– умение компенсировать отказы элементов системы изменением своих действий;

– убеждённое отторжение умышленных действий, увеличивающих опасность возникновения тяжелых отказов;

– исключение повторения одних и тех же ошибок и статистически устойчивых нарушений одних и тех же правил;

– компенсация возрастного фактора и склонности к заболеваниям поддержанием необходимого уровня физической формы и отказом от вредных привычек и самолечения лекарствами, несовместимыми с профессиональной деятельностью;

– наличие совокупности качеств, определяемых понятием «социальный человек».

6.5. Ремонтопригодность и система ТО и ремонтов

Ремонтопригодность является одним из свойств надёжности машин. Теоретические основы ремонтопригодности базируются на математической теории стационарной очереди, разработанной выдающимся советским ученым А. Я. Хинчиным, а также предельной теореме потоков однородных событий и теоретических разработках, посвященных исследованию операций, теории восстановления. Ремонтопригодной является такая конструкция машины, которая при оптимальных затратах на проектирование, изготовление и эксплуатацию за установленный цикл её работы будет наименьшее время находиться в неработоспособном состоянии.

В этом случае показателями ремонтопригодности являются время нахождения в неработоспособном состоянии, затраты труда и средств на осуществление технического обслуживания и ремонтов, рацио-

нальные затраты на производство и наименьший ущерб, наносимый простоями машин в период восстановления их работоспособности.

Объёмы и содержание, характер выполнения и оснащение работ, при выполнении в одном случае технического обслуживания, в другом ремонта, при которых привлекаются различные технические средства, состав и квалификация рабочих и специалистов, обусловили необходимость введения таких понятий, как *эксплуатационная технологичность и ремонтная технологичность.*

Эксплуатационная технологичность является свойством конструкции, которое характеризует приспособленность машины к проведению регулировочных и заправочных работ, всех видов технического обслуживания и эксплуатационных ремонтов в условиях рабочего цикла, при подготовке к работе и после окончания работы при оптимальной затрате труда, материалов, времени и средств.

Ремонтная технологичность является свойством конструкции машины и её составных частей, которое характеризует приспособленность к ремонтным работам, осуществляемым с целью восстановления утраченной работоспособности для обеспечения заданного ресурса, при оптимальных затратах труда, материалов, времени и средств.

Частными показателями ремонтопригодности являются: *контролепригодность, доступность, легкосъемность, взаимозаменяемость, унификация оборудования и инструмента.*

Контролепригодность характеризует приспособленность конструкции к контролю технического состояния методами технической диагностики.

Доступность применительно к агрегатам, узлам и деталям машины является свойством, которое характеризует приспособленность конструкции к удобному и быстрому осуществлению технологических операций при проведении операций технического обслуживания и ремонта (ТОР), устранении отказов и их последствий.

Легкосъемность характеризует конструкцию с точки зрения её приспособленности к выполнению операций разборки и сборки, вызванных необходимостью замены отказавших деталей, при проведении контроля технического состояния отдельных узлов и агрегатов.

Взаимозаменяемость является свойством конструкции, позволяющим из произвольного множества однородных деталей, узлов и агрегатов производить замену без дополнительной доработки при обеспечении всех нормируемых показателей надёжности. При этом допускается проведение необходимых регулировочных операций, преду-

смотренных конструкторской, технологической, ремонтной и эксплуатационной документацией.

Унификация оборудования и инструмента предполагает возможность использования имеющегося стандартного и нестандартного оборудования для осуществления ТОР конкретной машины в условиях различных эксплуатантов.

Обеспечение высокого уровня ремонтопригодности машин на этапе НИОКР является одной из наиболее сложных задач. Конечной целью обеспечения оптимальной ремонтопригодности на стадии проектирования является минимизация эксплуатационных затрат, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом. В связи с этим при проектировании необходимо выбрать оптимальное количество заменяемых деталей. Необходимо стремиться к минимальному числу регулировок.

В процессе проектирования машин следует обеспечить разработку новых и рациональное использование имеющихся технических средств для диагностирования технического состояния их узлов и агрегатов.

Оценка эксплуатационной технологичности ММ предусматривает учёт следующих параметров, по которым производится накопление информации: периодичность выполнения отдельных операций ТО, трудоемкость каждой операции ТО и ТР, количество крепежных деталей, в том числе стандартизированных и нестандартизированных, количество мест смазки, количество мест проведения крепежных и контрольно-регулировочных работ. Кроме этого, учитывается обеспечение инструментами и принадлежностями, оборудованием и приспособлениями для выполнения технического обслуживания и текущего ремонта. Очень важным показателем является агрегатно-узловая унификация машины.

Для дифференцированной оценки эксплуатационной технологичности применяют показатели, приведенные ниже, применительно к автомобилю.

Показатель эксплуатационной технологичности автомобиля по техническому обслуживанию $R_{T.O}$ представляет собой отношение удельной трудоемкости технического обслуживания к номинальному значению его основного параметра N ($\frac{чел.–ч / тыс. км}{единица\ параметра}$) и определяется по формуле

$$R_{T.O} = \frac{T_{T.O}}{l_{T.O}N}1000 = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{s}\left(\frac{T_{ij}^{уб}}{l_{ij}^{уб}} + \frac{T_{ij}^{см}}{l_{ij}^{см}} + \frac{T_{ij}^{кр}}{l_{ij}^{кр}} + \frac{T_{ij}^{р}}{l_{ij}^{р}}\right)\times\beta_{ij}\frac{1}{N}1000, \quad (6.51)$$

где $T_{ij}^{уб}, T_{ij}^{уб}, T_{ij}^{кр}, T_{ij}^{р}$ – средние трудоемкости выполнения i-й регламентной операции соответственно уборочных, смазочно-очистительных, крепежных и регулировочных работ j-го вида обслуживания, чел.-ч; β_{ij} – коэффициент сложности конструкции при выполнении i-й регламентной операции j-го вида обслуживания; N – основной параметр автомобиля; l_{ij} – периодичность выполнения i-й операции j-го вида обслуживания, км; m – количество регламентных операций технического обслуживания данного вида; S – количество видов технического обслуживания за цикл.

Показатель эксплуатационной технологичности автомобиля по текущему ремонту $R_{T.P}$ представляет собой отношение удельной трудоемкости текущего ремонта к номинальному значению его основного параметра:

$$R_{T.P} = \frac{T_{T.P}}{l_{T.P}N}1000 = \frac{\sum_{i=1}^{b}\sum_{j=1}^{c}T_{ij}^{T.P}}{l_i^{T.P}N}1000, \quad (6.52)$$

где $T_{ij}^{T.P}$ – средняя трудоемкость (основная и дополнительная) i-го текущего ремонта по j-му агрегату, узлу, детали, чел.-ч; $l_i^{T.P}$ – средняя наработка агрегата, узла, детали за определённый период эксплуатации, км; b – количество одноименных текущих ремонтов по j-му агрегату, узлу, детали; c – количество агрегатов, узлов деталей, подвергшихся текущему ремонту за определённый период эксплуатации; N – основной параметр автомобиля.

Уровень эксплуатационной технологичности по техническому обслуживанию $K_{У.T.O}$ позволяет произвести сравнительную оценку эксплуатационной технологичности новой конструкции изделия по отношению к существующим образцам отечественного и зарубежного производства или к базовому показателю технологичности конструкции, принятому за исходный:

$$K_{У.Т.О} = \frac{R_{Т.О}^{нов}}{R_{Т.О}^{баз}}, \quad (6.53)$$

где $R_{Т.О}^{нов}$, $R_{Т.О}^{баз}$ – соответственно показатели эксплуатационной технологичности по текущему обслуживанию новой конструкции изделия и существующей базовой.

Уровень эксплуатационной технологичности изделия по текущему ремонту $K_{У.Т.Р.}$ служит для оценки преимуществ или недостатков новой конструкции по сравнению с базовым показателем технологичности, принятым в качестве исходного для характеристики приспособленности изделия к выполнению текущего ремонта:

$$K_{У.Т.Р} = \frac{R_{Т.Р}^{нов}}{R_{Т.Р}^{баз}}, \quad (6.54)$$

где $R_{Т.Р}^{нов}, R_{Т.Р}^{баз}$ – показатели эксплуатационной технологичности по текущему ремонту новой конструкции изделия и существующей базовой.

Коэффициент приспособленности изделия к техническому обслуживанию характеризует конструктивные особенности изделия, заключающиеся в том, что для осуществления основного процесса по техническому обслуживанию необходимо выполнить определённый перечень предварительных работ. Он определяется отношением величины основной трудоемкости регламентированного перечня операций технического обслуживания к общей трудоемкости (основной и дополнительной). При этом под основной трудоемкостью следует понимать ту, которая непосредственно связана с выполнением конкретной операции технического обслуживания либо текущего ремонта в регламентированных условиях технического обслуживания и ремонта. Дополнительной трудоемкостью принято считать те виды работ, без предварительного проведения которых невозможно выполнить основные работы в регламентированных условиях технического обслуживания и ремонта.

Коэффициент приспособленности конструкции изделия к техническому обслуживанию вычисляется по формуле

$$K_{T.O}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{s}\left(T_{ij}\right)_{осн}^{T.O}\beta_{осн}^{T.O}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{s}\left(T_{ij}\right)_{осн}^{T.O}\beta_{осн}^{T.O}+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{s}\left(T_{ij}\right)_{доп}^{T.O}\beta_{доп}^{T.O}}. \qquad (6.55)$$

Здесь:

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{s}(T_{ij})_{осн}^{T.O}\beta_{осн}^{T.O}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{s}\left[(T_{ij})_{осн}^{уб}\beta_{ij\,осн}^{уб}+(T_{ij})_{осн}^{см}\beta_{ij\,осн}^{см}+\right. \qquad (6.56)$$
$$\left.+(T_{ij})_{осн}^{KP}\beta_{ij\,осн}^{KP}+(T_{ij})_{осн}^{P.Г}\beta_{ij\,осн}^{P.Г}\right],$$

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{s}\left(T_{ij}\right)_{доп}^{T.O}\beta_{доп}^{T.O}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{s}\left[\left(T_{ij}\right)_{доп}^{уб}\beta_{ij\,доп}^{уб}+\left(T_{ij}\right)_{доп}^{см}\beta_{ij\,доп}^{см}+\left(T_{ij}\right)_{доп}^{кр}\beta_{ij\,доп}^{см}+\left(T_{ij}\right)_{доп}^{P.Г}\beta_{ij\,доп}^{P.Г}\right], \qquad (6.57)$$

где $(T_{ij})_{осн}^{T.O}$ и $(T_{ij})_{доп}^{T.O}$ – соответственно основная и дополнительная трудоемкость выполнения *i*-й регламентированной операции *j*-го вида технического обслуживания за цикл, чел.-ч; $\beta_{осн}^{T.O}$, $\beta_{доп}^{T.O}$ – коэффициенты, характеризующие влияние сложности конструкции изделия на основные и дополнительные трудозатраты по техническому обслуживанию.

Коэффициент приспособленности конструкции изделия к текущему ремонту вычисляется по формуле

$$K_{T.P}=\frac{\sum_{i=1}^{b}\sum_{j=1}^{c}\left(T_{ij}\right)_{осн}^{T.P}\beta_{осн}^{T.P}}{\sum_{i=1}^{b}\sum_{j=1}^{c}\left(T_{ij}\right)_{осн}^{T.P}\beta_{осн}^{T.P}+\sum_{i=1}^{b}\sum_{j=1}^{c}\left(T_{ij}\right)_{доп}^{T.P}\beta_{доп}^{T.P}}, \qquad (6.58)$$

где $(T_{ij})_{осн}^{T.P}$, $(T_{ij})_{доп}^{T.P}$ – соответственно основная и дополнительная трудоемкости *i*-го текущего ремонта по *j*-му агрегату, узлу, детали; $\beta_{осн}^{T.P}$, $\beta_{доп}^{T.P}$ – коэффициенты, характеризующие влияние сложности конструк-

ции изделия на основные и дополнительные трудозатраты по текущему ремонту.

Удельное число операций технического обслуживания изделия по видам работ, $\frac{ед.операций/тыс.км}{T(л,м)}$, вычисляется по формуле

$$n_0 = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{S} n_{ij}}{l_{ij}N}1000, \qquad (6.59)$$

где n_{ij} – регламентированная i-я операция j-го вида обслуживания; l_{ij} – периодичность выполнения регламентированной i-й операции j-го вида обслуживания.

Показатель (6.59) рассчитывается раздельно по смазочно-очистительным, крепежным и регулировочным работам, отнесенным к 1000 км пробега.

Количество наименований горюче-смазочных материалов и технических жидкостей рассчитывается по формуле

$$n_i = n_1 + n_2 + n_3 + n_4, \qquad (6.60)$$

где n_1, n_2, n_3, n_4 – суммарное число марок соответственно горюче-смазочных материалов и технических жидкостей, рекомендуемых эксплуатационной документацией предприятия-изготовителя, без учёта заменителей и вспомогательных материалов, применяемых при техническом обслуживании и ремонте.

Коэффициент применяемости инструмента вычисляется по формуле

$$K_И = \frac{n_И}{n_T}, \qquad (6.61)$$

где $n_И$ – общее количество инструмента различного назначения, применяемого при техническом обслуживании и ремонте; n_T – суммарное количество точек, для которых предназначен инструмент.

Коэффициент повторяемости стандартных деталей изделия $K_{П.С.Д}$ является существенным фактором при оценке эксплуатационной технологичности автомобиля и выражается зависимостью

$$K_{П.С.Д} = 1 - \frac{n_{Т.Р.Д}}{n_{О.К.С.Д}}, \quad (6.62)$$

где $n_{Т.Р.Д}$ – количество типоразмеров стандартных деталей: крепежных, контрольных, заливных, сливных пробок, прокладок, сальников и др.; $n_{О.К.С.Д}$ – общее количество стандартных деталей.

После определения каждого из показателей эксплуатационной технологичности нового изделия определяются коэффициенты их сравнительной оценки по формуле

$$K_{С.О} = \frac{П_{нов}}{П_{баз}}, \quad (6.63)$$

где $П_{нов}$ – показатель эксплуатационной технологичности нового изделия; $П_{баз}$ – базовый показатель технологичности конструкции изделия, принятый за исходный при сравнительной оценке.

Если $K_{С.О} < 1$, то уровень эксплуатационной технологичности оцениваемого изделия выше базового изделия (аналога). Если значение этого коэффициента больше единицы, то уровень эксплуатационной технологичности оцениваемого изделия будет ниже базового изделия. Оценки показателей эксплуатационной технологичности автомобиля, его агрегатов и систем следует производить на всех этапах: разработки, модернизации и эксплуатации.

При проектировании новых машин, их изготовлении и модернизации необходимо стремиться к значениям величин показателей эксплуатационной технологичности, которые превосходили бы лучшие образцы отечественного и зарубежного производства. При необходимости предприятия-изготовители или разработчики по результатам оценки эксплуатационной технологичности изделия планируют мероприятия по улучшению показателей эксплуатационной технологичности, предусматривающие доработку конструкции.

Ремонтная технологичность характеризует приспособленность машины, её агрегатов, узлов и деталей к восстановлению утраченной работоспособности.

Для установления критериев оценки ремонтной технологичности деталей целесообразно выделить два вида ремонтных воздействий, обусловленных различными причинами. К первому виду следует отнести комплекс работ по восстановлению рабочих параметров деталей, нарушенных в результате воздействия деградационных процессов.

Ко второму виду относят ремонтные воздействия, обусловленные необходимостью создания новых установочных и вспомогательных баз у деталей, не предусмотренных конструкцией, исправление нарушенных форм деталей и др. Для определения влияния конструкции и технологии изготовления детали на ремонтную технологичность целесообразно всю технологически необходимую трудоемкость по восстановлению работоспособности детали $t^{T.H}$ разделить на два вида в соответствии с принятыми предпосылками:

$$t^{T.H} = t^{OC} + t^{BC}, \tag{6.64}$$

где t^{OC}, t^{BC} – соответственно основное и вспомогательное технологическое время.

Для *количественной оценки ремонтной технологичности детали* применяют показатель ремонтной технологичности $P^{Д}_{P.T}$, учитывающий техническое состояние деталей данного наименования, поступающих в капитальный ремонт, приспособленность их конструкции и технологии изготовления к восстановлению работоспособности, сложность ремонтного оборудования и экономическую целесообразность ремонта:

$$P^{Д}_{P.T} = P_{Г} + P_{P}\frac{\sum_{i=1}^{m} t_i^{oc} K_{ki}^{oc}}{\sum_{i=1}^{m} t_i^{oc} K_{ki}^{jcy} + \sum_{j=1}^{z} t_j^{вс} K_{kj}^{вс}} K_{O} K_{Э}, \tag{6.65}$$

где m – общее количество основных операций по восстановлению работоспособности детали; z – количество вспомогательных операций по восстановлению детали; t_i – трудоемкость i-й операции ремонта детали, чел.-ч; t_j – трудоемкость j-й вспомогательной операции ремонта детали, чел.-ч; K_{ki} – коэффициент квалификации работ i-й операции ремонта детали; K_o – коэффициент сложности оборудования; $K_э$ – коэффициент экономической целесообразности ремонта.

Коэффициент экономической целесообразности ремонта детали определяется по формуле

$$K_{Э} = \frac{S^{И}_{Д}}{S^{И}_{Д} + S^{Р}_{Д}}, \tag{6.66}$$

где $S_Д^H$ – прейскурантная стоимость новой детали, руб.; $S_Д^р$ – затраты на ремонт детали, руб.

Количественная оценка ремонтной технологичности узла $P_{P.T}^У$, учитывающая ремонтную технологичность входящих в него деталей и приспособленность к разборочно-сборочным работам, может быть определена по формуле

$$P_{P.T}^У = \frac{\sum_{i=1}^{e} T_i^{oc} K_{ki}^{oc}}{\sum_{i=1}^{e} T_i^{oc} K_{ki}^{oc} + \sum_{j=1}^{f} T_j^{вс} K_{kj}^{вс}} \cdot \frac{\sum_{q=1}^{n_\Sigma^У} P_{P.T.q}^Д}{\sum_{q=1}^{n_\Sigma^У} S_q^Д}, \qquad (6.67)$$

где e – количество основных разборочно-сборочных операций; f – количество вспомогательных разборочно-сборочных операций; T – трудоемкость разборочно-сборочных операций, чел.-ч; $n_\Sigma^У$ – количество деталей, входящих в узел; $P_{P.T.q}^Д$ – показатель ремонтной технологичности q-й детали; $S_q^Д$ – стоимость q-й детали.

Количественная оценка ремонтной технологичности узлов предоставляет возможность объективно оценить их ремонтную сложность, определить несовершенство конструкции узла и входящих в него деталей. Анализ показателей ремонтной технологичности узлов позволяет оценить трудовые и материальные затраты при капитальном ремонте автомобилей. Значения $P_{P.T}^Д$ и $P_{P.T}^У$ могут находиться в пределах от 0 до 1, и чем ближе к 1, тем совершеннее ремонтная технологичность автомобиля.

Требования к ремонтопригодности проектируемого изделия чаще всего задаются в виде вероятности восстановления его работоспособности за отведенное время $V(t)$ (оперативный показатель) либо в виде среднего времени восстановления станции $\overline{T}_B$ (технический показатель). Часто требования к ремонтопригодности задаются косвенно – через коэффициент готовности K_r, значение которого для достаточно большого периода эксплуатации равно

$$K_r = \overline{T}_0 / (\overline{T}_0 + \overline{T}_B). \qquad (6.68)$$

Напомним, что этот показатель имеет смысл вероятности фиксации объекта в работоспособном состоянии в произвольный момент времени. Запишем коэффициент готовности изделия в виде

$$K_r = \frac{\overline{T}_0}{\overline{T}_0 + \overline{T}_B} = \frac{1}{1 + \overline{T}_B / \overline{T}_0} = \frac{1}{1 + u_c}. \qquad (6.69)$$

Величину u_c назовем коэффициентом средних удельных затрат на восстановление работоспособности изделия или коэффициентом затрат на восстановление. Этот коэффициент показывает, сколько времени в среднем потребуется на восстановление работоспособности изделия для обеспечения единицы наработки (моточаса, километра пробега и др.) безотказной работы.

При заданном значении коэффициента готовности проект должен быть выполнен таким образом, чтобы расчётное значение коэффициента готовности было не хуже заданного:

$$K_{r.p} \geq K_{r.з}. \qquad (6.70)$$

Это условие будет выполнено, если коэффициент затрат на восстановление будет удовлетворять условию

$$u_c = \frac{\overline{T}_B}{\overline{T}_0} \leq \frac{1 - K_{r.з}}{K_{r.з}}. \qquad (6.71)$$

Множество комбинаций $\overline{T}_o$ и $\overline{T}_B$, удовлетворяющих этому неравенству, образует область допустимых вариантов проекта изделия. Понятно, что в процессе проектирования необходимо добиваться компромисса между наработкой на отказ $\overline{T}_o$ и средним временем восстановления $\overline{T}_B$.

Ограничимся случаем, когда наработка изделия на отказ определена исходя из заданной вероятности безотказной работы и известно заданное или нормированное значение коэффициента готовности $K_{r.з}$. В этом случае при известном значении $\overline{T}_{o.p}$ и заданном значении коэффициента готовности станции $K_{r.з}$ область допустимых значений среднего времени восстановления изделия должна лежать ниже некоторого допустимого значения $\overline{T}_{B.доп}$:

$$\overline{T}_B \leq T_{B.доп} = \overline{T}_{o.p} \frac{1 - K_{r.з}}{K_{r.з}}. \qquad (6.72)$$

При этом не исключено, что расчётное допустимое время восстановления $\overline{T}_{B.доп}$ будет иметь столь малую величину, что за это

время отремонтировать изделие будет технически невозможно, и тогда придется увеличивать наработку на отказ изделия для получения приемлемого значения допустимого среднего времени восстановления $\overline{T}_{B.доп}$ при фиксированном заданном значении коэффициента готовности. В этом случае вначале необходимо оценить допустимое время восстановления при заданной или известной наработке на отказ $\overline{T}_{o.p}$.

Определим среднее время восстановления мобильной машины (ММ), которая в целом отказывает при отказе любого узла или агрегата и считается неработоспособной до тех пор, пока отказавшая часть конструкции не будет отремонтирована.

Введём некоторые граничные условия. При расчёте показателей безотказности изделия интенсивности отказов отдельных конструктивных элементов (деталей) принимались постоянными, т. е. время их безотказной работы принимается распределённым экспоненциально, и параметры потоков отказов отдельных деталей, узлов, агрегатов и ММ в целом равны соответствующим интенсивностям отказов, поскольку каждый элемент при замене его после отказа аналогичным образует простейший поток восстановления. Поэтому ω_i вычисляется по формуле

$$\omega_i = \lambda, \text{ а } \omega_c = \lambda_c. \tag{6.73}$$

С учётом этого среднее время восстановления изделия можно записать в виде

$$\overline{T}_B = \sum_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\lambda_c} \overline{T}_{B.i} = \sum_{i=1}^{n} Q_i \overline{T}_{B.i}, \tag{6.74}$$

где Q_i – расчётная вероятность отказа изделия из-за отказа i-й конструктивной составляющей; $\overline{T}_{B.i}$ – среднее время восстановления i-й конструктивной составляющей.

С учётом того, что $1/\omega_c = 1/\lambda_c = \overline{T}_o$ – наработка изделия на отказ, а $1/\omega_i = 1/\lambda_i = \overline{T}_{o.i}$ – наработка на отказ i-й конструктивной составляющей, среднее время восстановления машины можно записать в виде

$$\overline{T}_B = \overline{T}_o \sum_{i=1}^{n} \frac{\overline{T}_{B.i}}{\overline{T}_{o.i}} = \overline{T}_o \sum_{i=1}^{n} u_i, \tag{6.75}$$

где u_i – коэффициент затрат на восстановление i-й конструктивной составляющей.

Подставив полученное значение в формулу для определения значения коэффициента готовности, получим выражение

$$K_r = \frac{\overline{T}_0}{\overline{T}_0 + \overline{T}_o \sum_{i=0}^{n} u_i} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} u_i}. \qquad (6.76)$$

Откуда следует, что коэффициент затрат на восстановление изделия равен сумме коэффициентов затрат на восстановление отдельных составляющих:

$$u_c = \sum_{i=1}^{n} u_i . \qquad (6.77)$$

В настоящее время доминирующей является концепция создания технических систем, все составляющие которых равнонадёжны, в том числе и с позиций ремонтопригодности. Используем аддитивность показателя (6.77) для распределения требований к ремонтопригодности машины между её отдельными составляющими. При этом наибольший интерес представляет среднее время восстановления каждой составляющей с точки зрения влияния на коэффициент готовности машины. При распределении требований с позиции «равного влияния» каждой составляющей на коэффициент готовности машины условимся о равенстве коэффициентов затрат на восстановление отдельных составляющих, т. е.

$$\frac{\overline{T}_{B.1}}{\overline{T}_{o.1}} = \frac{\overline{T}_{B.2}}{\overline{T}_{o.2}} = ... = \frac{\overline{T}_{B.n}}{\overline{T}_{o.n}}. \qquad (6.78)$$

Это требование означает, что, например, агрегат, отказывающий чаще, должен восстанавливаться быстрее по сравнению с агрегатом, который отказывает реже. Из (6.78) с учётом требований (6.71) получаем, что для обеспечения заданного коэффициента готовности машины допустимое среднее время восстановления каждого агрегата должно быть не более

$$\overline{T}_{B.i.доп} = \frac{u_c}{n} \overline{T}_{oi.p} \le \frac{(1 - K_{r.з}) \overline{T}_{oi.p}}{K_{r.з} n}. \qquad (6.79)$$

Проиллюстрируем распределение требований к восстанавливаемости отдельных блоков двумя простыми примерами.

Пример 1. Определить, сколько времени можно затратить на ремонт каждого из двух агрегатов ММ, чтобы коэффициент готовности

машины был не хуже заданного $K_{г.з}$ = 0,99, если наработка на отказ 1-го агрегата равна $\overline{T}_{о.1}$= 250 моточасов, а 2-го – $\overline{T}_{о.2}$=1000 моточасов. Машина отказывает при отказе любого агрегата и считается неработоспособной до тех пор, пока не будет отремонтирован отказавший агрегат.

Решение. Потребуем равенства коэффициентов затрат на восстановление каждого из двух агрегатов. Тогда в соответствии с формулой (6.79) получаем:

$$T_{В.1.доп} = \frac{1-0,99}{0,99} \times \frac{250}{2} = 1,3 \text{ ч},$$

$$T_{В.2.доп} = \frac{1-0,99}{0,99} \times \frac{1000}{2} = 5,1 \text{ ч}.$$

Планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта машин. Техническое обслуживание (ТО) представляет собой комплекс работ для подержания исправности или только работоспособности машины при использовании по назначению, хранении и транспортировании.

Комплекс работ должен быть минимальным и достаточным для решения задач технического обслуживания: 1) снижение скорости повреждающих процессов; 2) обеспечение нормируемого или заданного уровня безотказности в периоды между обслуживаниями; 3) эффективное использование топлива и других эксплуатационных материалов.

Снижение скорости повреждающих процессов увеличивает наработки конструктивных элементов на отказ, повышает показатели безотказности, снижает простои машин в ремонтах, в том числе и в периоды между обслуживаниями. Этому способствует также применение технического диагностирования. Все это уменьшает удельную стоимость устранения отказов и, следовательно, увеличивает ресурсы машин.

При этом нельзя не учитывать, что для проведения ТО требуются материалы и трудовые ресурсы на выполнение регламентируемого объёма работ, и теоретически стоимость ТО может достигнуть величины, превышающей эффект от устранения отказов. Следовательно, задача по формированию комплекса работ по ТО решается с позиций оптимизации – обеспечения наибольшей интегральной эффективно-

сти. Примем критерий оптимизации – максимум эффекта на единицу затрат, необходимых для его достижения, частным проявлением которого является минимум суммарной удельной стоимости.

Для определения целевой функции в соответствии с принятым критерием воспользуемся соотношением

$$C(t)_{\min} = \frac{C_o}{t_p}\left(1+\frac{1}{x}\right)+C_{TO} \to \min . \qquad (6.80)$$

Ресурс t_p определяют по формуле

$$t_p = \left(\frac{C_o^{(x+1)}}{b_x}\right)^{\frac{1}{x}+1} . \qquad (6.81)$$

При изменении объёма работ ТО соответственно изменяется и удельная стоимость C_{mo} на его проведение, что приводит к изменению углового коэффициента b_x кривой интервальной стоимости поддержания безотказности, если предусматриваемое изменение объёма работ коррелировано с наработками на отказы. Изменение коэффициента b приводит к изменению ресурса машины t_p.

Применительно к стоимости машины C_0 и соответствующего этой стоимости уровня безотказности x, входящим в уравнение (6.80), объём ТО не оказывает существенного влияния, если он формируется на стадии эксплуатации, когда в конструкцию машины не вносят изменений.

Следовательно, изменение стоимости комплекса работ ТО не влияет на затраты на поддержание безотказности за ресурс, определяемые соотношением

$$C_{mp} = C_0 \Big/ x . \qquad (6.82)$$

Однако при этом изменяется ресурс, поскольку на его значение влияет величина углового коэффициента b, что количественно оценивается соотношением

$$C_{mp} = \frac{b}{x+1} t_p^{x+1} . \qquad (6.83)$$

Выявим, как изменится ресурс t_{p1} машины, если увеличим комплекс работ, в результате чего стоимость C_{mo1} увеличится на ΔC_{mo} и достигнет C_{mo2}, а угловой коэффициент b_1 уменьшится и станет b_2.

На рисунке 6.38 отражено влияние стоимости комплекса работ ТО на средний ресурс t_p и удельную стоимость $c(t)_{\min}$.

Для определения ресурса t_{p2}, соответствующего C_{TO2}, воспользуемся соотношением (6.82). На рисунке 6.38 площади А и В равны, поэтому справедливо равенство

$$\frac{b_1}{x+1} t_{p1}^{x+1} = \frac{b_2}{x+1} t_{p2}^{x+1},$$

из которого следует соотношение

$$t_{p2} = t_{p1} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{\frac{1}{x+1}} = t_{p1} k, \qquad (6.84)$$

$$k = \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{\frac{1}{x+1}} \text{ и } \quad k \geq 1.$$

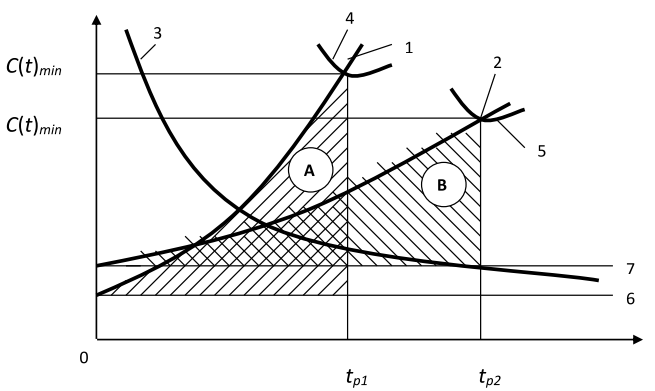


Рис. 6.38 – Влияние стоимости комплекса работ ТО на ресурс и средние удельные стоимости:
1, *2* – удельные интервальные стоимости поддержания безотказности до и после изменения комплекса работ соответственно; *3* – удельные средние стоимости приобретения машины; *4*, *5* – суммарные стоимости приобретения и поддержания безотказности до и после изменения комплекса работ соответственно; *6*, *7* – удельные стоимости выполнения комплекса работ до и после его изменения соответственно.

Используя соотношение (6.84) для преобразования уравнения (6.80), получим

$$c(t)_{\min} = \frac{C_0}{t_p k}\left(1+\frac{1}{x}\right) + C_{TO} + \Delta C_{TO}\,. \qquad (6.85)$$

Увеличивая комплекс работ от минимально необходимого объёма, можно выявить ряд значений k и ΔC_{TO} и выбрать с использованием уравнения (6.85) желаемые величины $c(t)_{\min}$ и соответствующий t_p.

Действующая планово-предупредительная система ТОР предусматривает ежедневное техническое обслуживание (ЕО) и комплекс технических обслуживаний (ТО), выполняемых в плановом порядке через определённые наработки. Виды ТО различаются между собой периодичностью выполнения и составом работ, а следовательно, трудоемкостью и простоями. Каждому виду в зависимости от последовательности его проведения присваивают порядковый номер начиная с первого: ТО-1, ТО-2 и т. д. В состав работ ТО, имеющего более высокий порядковый номер, входят работы каждого из предшествующих видов воздействий. Кроме того, проводят сезонное обслуживание (СО), выполняемое 2 раза в год при подготовке машины к использованию в периоды летнего или зимнего сезонов.

Планово-предупредительная система предусматривает также текущие (ТР) и капитальные (КР) ремонты. Текущий ремонт планируют (для дорожных и других технологических машин) или проводят по потребности (например, для автомобилей). Для автомобилей нормируются только трудоемкость и простои в удельном исчислении на единицу наработки. Для дорожных машин предусматриваются: ЕО, выполняемое перед началом рабочей смены, в течение её или после; ТО-1, выполняемое в большинстве случаев с периодичностью $t_1 = 60$ ч; ТО-2 с периодичностью $t_2 = 240$ ч; ТО-3 с периодичностью $t_3 = 960$ ч. Текущий ремонт (ТР) машин на базе тракторов и с тракторными двигателями совпадает по периодичности с ТО-3, поэтому их проводят одновременно. Нормируются ресурсы $t_{кр}$ до капитального ремонта (КР).

Коэффициент технического использования необходимо определять по нормативным данным и затем сопоставлять его с фактически достигнутым значением. Для определения коэффициента технического использования по нормативным данным воспользуемся соотношением

$$K_{T.И} = \frac{1}{1 + Bt_{cc}}, \qquad (6.86)$$

в котором удельные простои B определяются по нормативным данным. При определении удельного простоя по каждому виду воздействий необходимо учитывать, что в состав очередного ТО, имеющего более высокий порядковый номер, входят работы каждого из предыдущего. С учётом сделанных предпосылок удельные простои (в днях простоя/100 ч) рассчитываются по формуле

$$B = \frac{Д_1}{t_1}\left(1 - a_1\right) + \frac{Д_2}{t_2}(1 - a_2) + \frac{Д_{TP}}{t_{TP}}\left(1 - a_{TP}\right) + \frac{Д_{KP}}{t_{KP}}, \qquad (6.87)$$

где a_1, a_2, a_{TP} – частоты совпадений соответственно ТО-1 с ТО-2, ТО-2 с ТР, ТР с КР; $a_1 = t_1 / t_2$; $a_2 = t_2 / t_{TP}$; $a_{TP} = t_{TP} / t_{KP}$.

В общем случае, когда число воздействий $1, 2, \ldots, i, m - 1$, соотношение (6.87) имеет вид

$$B = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{D_i}{t_i}\left(1 - a_i\right) + \frac{D_m}{t_m}. \qquad (6.88)$$

Например, для автомобилей планово-предупредительная система ТОР предусматривает нормативы периодичностей и простоев при выполнении ТО-1, ТО-2 и капитального ремонта. Текущий ремонт нормируется простоем $Д_P$ и трудоемкостью T_P на единицу наработки (1000 км).

В связи с этим удельные простои рассчитывают по уравнению

$$B = \frac{Д_1}{t_1}\left(1 - a_1\right) + \frac{Д_2}{t_2}\left(1 - a_2\right) + Д_P + \frac{Д_{KP}}{t_{KP}}. \qquad (6.89)$$

Обеспечение значения коэффициента технического использования, соответствующего нормативному, имеет главным условием проведение комплекса ТОР в строгом соответствии с установленными периодичностями.

ТР предназначен для обеспечения работоспособного состояния машины с восстановлением или заменой отдельных агрегатов, узлов и деталей (кроме базовых), достигших предельно допустимого состояния. Для сокращения времени простоя подвижного состава ТР выполняется преимущественно агрегатным методом, при котором про-

изводится замена неисправных или требующих капитального ремонта агрегатов и узлов на исправные, взятые из оборотного фонда.

Направление машин и агрегатов на капитальный ремонт (КР) производится на основании результатов анализа их технического состояния с применением средств контроля (диагностирования) с учётом наработки, выполненной с начала эксплуатации или после КР; суммарной стоимости израсходованных запасных частей с начала эксплуатации и других затрат на ТР.

В реальных условиях эксплуатации достаточно просто определить затраты на запасные части, которые точно и достоверно обеспечиваются бухгалтерским учётом. Существует тесная связь (коэффициент корреляции $r \geq 0{,}7$) между затратами на запасные части и соответственно трудовыми затратами А, затратами на материалы В и компенсацию простоев С. Поэтому критерием, характеризующим нормальное использование ресурса, можно считать расход запасных частей как функцию наработки. Поэтому для управления процессом использования ресурса следует рассчитывать суммарные стоимости $C_{з.ч}(t)$ по интервалам наработки и рассматривать их в качестве норматива по формуле

$$C_{з.ч}(t) = \frac{b}{1 + A + B + C} t^{x}. \qquad (6.90)$$

Затем фактические расходы необходимо сопоставить с расчётными нормативными значениями. Если фактические расходы не превышают нормативных, то процесс эксплуатации данной машины протекает нормально. В противном случае необходимо выявить причины перерасхода и принять соответствующие меры.

Таким образом, метод управления надёжностью машин в эксплуатации сводится к определению нормы расхода запасных частей (в стоимостном выражении) и соответствующего ей ресурса. При достижении некоторого максимального значения суммарного нормативного расхода машину направляют в капитальный ремонт или списывают.

Для обеспечения систематического контроля за техническим состоянием машины, использованием её ресурса, выявления фактов неправильной эксплуатации и своевременного принятия соответствующих организационно-технических мер нормы расхода запасных частей назначают интервально – по интервалам наработки.

Определение потребности в оборотных агрегатах и запасных частях. Наличие k требований на замену агрегатов означает наличие k неисправных агрегатов, а вероятность того, что в произвольный момент времени в системе имеется k требований, исходя из простейшего их потока, определяется по формуле

$$P_k = \frac{(\lambda m_{ioo})^k}{k!} e^{-\lambda m_{ioo}}, \qquad (6.91)$$

где m_{ioo} – средняя продолжительность оборота агрегата, сут; λ – среднее число отказывающих агрегатов и подлежащих замене на агрегаты оборотного фонда, 1/сут ($\lambda = t_{cc}N_p/t_p$).

Пусть оборотный фонд состоит из n агрегатов. Отсутствие простоя машин в результате наличия оборотных агрегатов соответствует ситуации, при которой число требований на замену агрегатов в системе использования оборотного фонда будет меньше числа n. Поэтому вероятность отсутствия простоя $P_{o.np}$ в произвольный момент времени определяется суммой вероятностей P_k для всех k, меньших n, по формуле

$$P_{o.np} = \sum_{k=0}^{n} \frac{(\lambda m_{too})^k}{k!} e^{-\lambda m_{tj}}, \qquad (6.92)$$

а вероятность простоя по формуле

$$F_{np} = 1 - P_{o.np}. \qquad (6.93)$$

Простой машины D_{np} в зависимости от обеспеченности исправными агрегатами изменяется от нуля до времени оборота m_{too} агрегата, что соответствует значениям вероятности простоя от единицы до нуля и определяется произведением:

$$D_{np} = m_{too} F_{np}.$$

С учётом сделанных предпосылок определим коэффициент готовности для общего случая, когда $F_{np} \le 1$ и время замены агрегата $D_{з.а}$:

$$k_T = \frac{1}{1+\rho}, \qquad (6.94)$$

где $\rho = (D_{з.а} + m_{too}F_{np})t_{cc}/T_0$.

Как показывают расчёты, оптимальному числу агрегатов соответствуют малые значения вероятности простоев $F_{пр}$, что объясняется относительно невысокой стоимостью агрегатов по отношению к стоимости парка машин и достаточно большим количеством машин, для которых предназначен один агрегат. Поэтому определять число оборотных агрегатов для действующего парка следует, исходя из обеспечения вероятности $F_{пр} = 0{,}02–0{,}03$.

Потребность в заменах агрегатов эксплуатационные предприятия систематически определяют на планируемый период (год, квартал), что необходимо для планирования по потребителям ремонтных заводов и других целей.

Потребность в замене агрегатов рассчитывают делением суммарной наработки $\sum_{i=1}^{N_{сп}} t_{плi}$ парка $N_{сп}$ машин данной модели за планируемый период $t_{пл}$ на средний ресурс $t_р$ данного агрегата той же модели по формуле

$$N_э = \sum_{i=1}^{N_{сп}} t_{плi} / t_р . \qquad (6.95)$$

Приведенный метод расчёта может применяться в тех случаях, когда парк машин однороден и равномерно распределён по интервалам наработки в течение ресурсов машин. Однако при замене моделей машин, организации новых эксплуатационных предприятий, смене климатических зон или неравномерном пополнении предприятия новыми машинами использование данного метода приводит к заметным ошибкам.

Среднюю годовую потребность $m_{ср}$ в запасных частях часто определяют, исходя из наработки $t_{ам}$ за амортизационный период $n_л$ (в годах), полных ресурсов до первой замены $t_{р.пд}$ и между заменами $t_{рп.з.ч}$ данной детали, числа машин $N_{сп}$ данной модели, по соотношению

$$m_{ср} = \frac{N_{сп} n \left(t_{ам} - t_{р.пд} \right)}{n_л t_{рп.з.ч}}, \qquad (6.96)$$

где n – число деталей одного наименования на машине.

При использовании этого соотношения следует иметь в виду, что возможны случаи, когда средние полные ресурсы деталей равны

или больше наработки $t_{ам}$. Такая ситуация не исключает в полной мере необходимости в запасных частях данного наименования, в силу того, что в расчётные уравнения входят средние ресурсы и не учитываются их рассеивания. Поэтому потребности запасных частей следует рассчитывать с использованием вероятностных методов с использованием всех необходимых статистических моментов случайных величин, характеризующих процесс восстановления.

Показатели процессов восстановления определяют, исходя из приведенных средних полных ресурсов. Приемлемый результат получается при использовании этих показателей, определённых для расчёта среднего числа отказов (замен) $\Omega(t)$, $\omega(t)$ и числа циклов $\nu(t)$ эксплуатации восстанавливаемых конструктивных элементов – $\Omega(T)/\nu(t)$ и $\omega(t)/\nu(t)$, когда $\nu(t) > 1$. Поэтому для определения годовой потребности следует воспользоваться соотношением

$$З_э = \sum_{i=1}^{k} З_i = \sum_{i=1}^{k} M_i \left[\Omega_{эi}\left(t_н + t_{пл}\right) - \Omega_{эi}\left(t_н\right)\right], \qquad (6.97)$$

а результат расчёта уменьшить в $\nu(t)$ раз, а также учесть, что на машине может быть установлено n деталей одного наименования и $n \geq 1$.

Для определения n_i (рис. 6.39) максимальная наработка t с начала эксплуатации машины разбита на интервалы Δt_τ. Таких интервалов 1, 2, …, i, …, $k-1$, k.

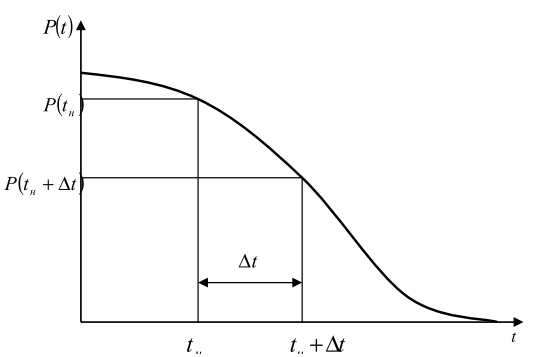
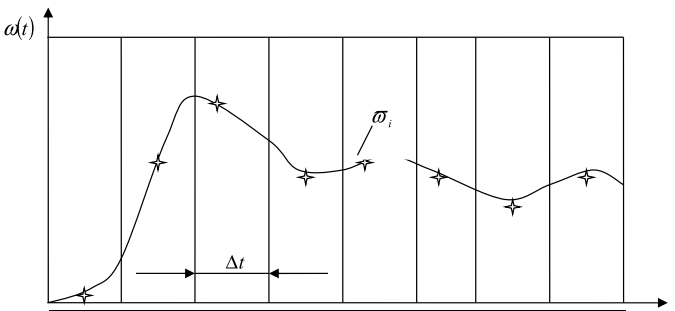


Рис. 6.39 – Зависимость вероятности безотказной работы от интервала наработки

По j-й машине необходимо иметь информацию о наработках с начала эксплуатации или после ремонта до начала очередного периода поставки запасных частей, а также планируемую наработку за этот период. По этим данным определяют в соответствии с осью t (рис. 6.40) и j-му номеру машины начало и окончание отрезков прямых, отражающих наработку j_{ij}–j-й машины в i-м интервале.



№ машин	1	2	3	…	i	…	k–1	k	t
1									
2									
3									
- - - - - - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - -	- - -	- - - -	
j									
- - - - - - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - -	- - - -	- - - -	
m-1									
m									
$n_i = \sum_{j=1}^{m} t_{ij} / \Delta t$									
$F_i(t) = \Delta t \varpi_i$									
$n_i \varpi_i \Delta t$									$\sum n_i \omega_i \Delta$

Рис. 6.40 – Схема расчёта среднего расхода запасных частей

Суммирование этих наработок по интервалам и деление суммы на ширину интервала выявляет расчётное число n_i по интервалам наработки:

$$n_i = \sum_{j=1}^{m} t_{ij} / \Delta t_\tau .$$

Необходимо учесть, что если на машине установлено n деталей одного наименования и $n > 1$, то в расчёт принимают произведение $n_i n$.

С учётом названных предпосылок предварительно определим вероятность отказа детали в i-м интервале:

$$F_i(t) = \omega_{з.ч}(t)\Delta t_\tau .$$

Поскольку математическое ожидание числа появлений события при нескольких опытах равно сумме вероятностей события в отдельных опытах, определим средний расход запасных частей согласно рисунку 6.40:

$$m_{ср} = \sum n_i F_i(t) = \sum n_i \omega_{з.чi}(t)\Delta t_\tau . \qquad (6.98)$$

Величина $m_{ср}$ представляет собой среднюю потребность заданного числа машин, имеющих различные наработки, в заменах рассматриваемой детали.

Поскольку отказы деталей в различных машинах являются независимыми событиями, а дисперсия числа появлений события при нескольких независимых опытах равна сумме произведений вероятностей появления и непоявления события в каждом опыте, то дисперсия числа отказов в течение рассматриваемого промежутка времени рассчитывается по формуле

$$D_{з.ч} = \sum n_i \omega_{з.чi}\left|1 - \omega_{з.чi}\Delta t_\tau\right|\Delta t_\tau . \qquad (6.99)$$

Чтобы гарантировать с приемлемой вероятностью удовлетворение потребности всех машин в запасных частях, на складе должно находиться некоторое число запасных частей m_α, которое больше $m_{ср}$:

$$m_\alpha = m_{ср} + U_p\sqrt{D_{з.ч}} = m_{ср} + U_p\sigma_{з.ч}; \quad \sigma_{з.ч} = \sqrt{D_{з.ч}}, \qquad (6.100)$$

где U_p – односторонний квантиль нормированного нормального распределения.

Заказываемое число запасных частей на планируемый период должно дополнять число запасных частей, находящихся на складе в наличии, до величины m_α.

Уровень гарантированной вероятности α наличия запасных частей на складе должен устанавливаться для определённого числа машин на основании исходных предпосылок, учитывающих доминирующие факторы организационно-технического и экономического характера.

При организации эксплуатации машин часто возникает необходимость в кратковременном прогнозировании потребности в одной замене элемента по парку машин за наработку Δt, что особо важно при работе их в отрыве от основной базы, имея в виду комплектование подвижных ремонтных средств.

Для этого определяют интервальную вероятность отказа $F(t; t + \Delta t)$ – вероятность того, что за интервал от t до $t + \Delta t$ произойдет отказ (рис. 6.39). Для элемента эта вероятность определяется по формуле

$$F_э\left(t;t+\Delta t\right)=1-\frac{P_э\left(t+\Delta t\right)}{P_э\left(t\right)}. \qquad (6.101)$$

Общее число отказов данного элемента за планируемую наработку по парку $N_{сп}$ машин при условии, что вероятность отказов $F(t; t + \Delta t) \le 0{,}10$, равна сумме интервальных вероятностей:

$$N_э = \sum_{i=1}^{N_{сп}} F_{эi}\left(t;t+\Delta t\right). \qquad (6.102)$$

Если $F_э(t; t + \Delta t) > 0{,}10$, то следует применять показатель интенсивности отказов $\lambda(t)$, предварительно разбив интервал Δt на m участков шириной $\Delta t'$ и принимать $\lambda_{ср}(t)$ средней на наработке $\Delta t'$.

$$N_э = \sum_{n=1}^{N_{сп}}\left[\sum_{j=1}^{m}\lambda_{срj}\,\Delta t\right]_i. \qquad (6.103)$$

Условием использования рассмотренного метода статистического прогнозирования текущих ремонтов является наличие информации по распределению ресурсов, а также по наработкам t с начала установки элементов на машину и по наработкам Δt на планируемый период. Этих данных достаточно для использования соотношения (6.102).

6.6. Нормирование показателей надёжности

Надёжность – это качество, распределённое во времени, свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или наработки. Надёжность есть комплексное, многостороннее свойство, которое обуславливается безотказностью, ремонтопригодностью, долговечностью и сохраняемостью изделия.

Для каждого типа (класса) технических объектов определённого функционального назначения, степени сложности, режима эксплуатации, характера и последствий отказов выбираются и нормируются свои показатели надёжности. Правильность выбора показателей надёжности и их количественных значений оказывают решающее влияние на схемно-конструктивные решения при создании изделия, определение параметров всех конструктивных составляющих в процессе рабочего проектирования, назначение параметров технологических процессов, назначение режимов эксплуатации, разработку методов испытаний и организацию системы ТОР.

Очевидно, что работоспособность определяется значениями рабочих характеристик – выходных параметров машины. Выход рабочих параметров за пределы допуска означает отказ. Иногда отказ машины по одному параметру или отказ какой-либо конструктивной составляющей сохраняет возможность функционирования машины с пониженными параметрами эффективности.

Для всего множества разнообразных технических устройств факторы, влияющие на их показатели надёжности, можно разделить на следующие классы:

– факторы, характеризующие особенности конструкции. По этому признаку различают ремонтируемые и неремонтируемые технические устройства;

– факторы характера и режима использования изделий по назначению отражают продолжительность эксплуатации, временное распределение нагрузки и её напряжённости в процессе эксплуатации;

– факторы последствий отказа технических устройств в целом характеризуются размером ущерба;

– факторы функциональной структуры, отражающие состояние технических устройств в процессе эксплуатации и наличие в них разных видов избыточности (структурной, временно́й, информативной, энергетической);

– факторы организации эксплуатации отражают предусматриваемые виды технического обслуживания и ремонта с необходимой материальной базой и квалификацией обслуживающего и ремонтного персонала;

– факторы условий применения характеризуют область использования изделий – внутри страны или за её пределами, климатические факторы эксплуатации и др.

Перечисленные выше основные факторы оказывают решающее воздействие на процессы изменения работоспособности машин, показатели эффективности их использования и в итоге – на выбор количественных показателей надёжности машины в целом и её конструктивных составляющих.

С целью обеспечения регламентированной работоспособности изделий в условиях реальной эксплуатации необходимо нормирование основных показателей надёжности, допустимые значения которых должны оговариваться в технических условиях и других нормативно-технических документах на изделие. Выбор показателей надёжности чаще всего определяется заказчиком. Обычно нормируют вероятность безотказной работы $P(t)$ при заданном ресурсе T_p, в течение которого она регламентируется. Значение T_p должно быть согласовано со структурой и периодичностью ремонтных работ и технического обслуживания, а допустимая вероятность безотказной работы является мерой опасности последствий отказа. Чем выше требования к объекту, тем больше допустимое значение $P(t)$.

В общем случае градация изделий по классам надёжности представлена в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Классы надёжности

Класс надёжности	0	1	2	3	4	5
Допустимое значение $P(t)$	<0,9	>0,9	>0,99	>0,999	>0,9999	1

Отметим, что приведённые значения $P(t)$ заданы для определённого периода эксплуатации T_p при условии строгой регламентации и выполнения режимов работы и условий эксплуатации.

В нулевой класс входят малоответственные детали и узлы, отказ которых остается практически без последствий. Для них адекватными

и приемлемыми показателями надёжности могут быть средний срок службы, ресурс или наработка на отказ.

Классы с первого по четвёртый характеризуются повышенными требованиями к безотказной работе (номер класса соответствует числу девяток после запятой). В 5-й класс включаются высоконадёжные изделия, отказ которых в заданный период недопустим.

В машиностроении обычно задаются значения коэффициента готовности $K_Г$, среднего время пребывания объекта в работоспособном состоянии $\overline{T}_P$, наработки до первого отказа и средней наработки на отказ.

При нормировании показателей надёжности по составным частям объектов используют следующие методы нормирования:

– равной надёжности;

– учёта сложности элементов и числа их предельных состояний;

– оптимального распределения требований по надёжности с учётом ограничений по массе, стоимости и другим характеристикам элементов;

– нормирования с учётом проверок и восстановления элементов системы в процессе эксплуатации;

– нормирования с учётом и оптимизацией затрат на экспериментальную отработку системы.

В общем случае задача нормирования надёжности элементов сводится к оптимизации целевой функции, которая в свою очередь является функцией точечных значений оценок надёжности элементов:

$$G = G(P_i),\ i = \overline{1, N}, \tag{6.104}$$

где P_i – оценка надёжности i-го элемента; N – число элементов, входящих в систему.

В качестве *целевой функции* можно выбрать минимальную стоимость (C), массу (M) и др.:

$$\begin{aligned} &G = C; \quad C = C(P_i),\ i = \overline{1, N}, \\ &G = M; \quad M = M(P_i),\ i = \overline{1, N}. \end{aligned} \tag{6.105}$$

В процессе решения отыскивают вектор $P = (P_1, P_2, ..., P_N)$, минимизирующий C или M.

В ряде случаев нормирование осуществляют при условии выполнения не только требований по надёжности системы, но и требо-

ваний по её безопасности. Тогда в качестве функции надёжности дополнительно используют *функцию безопасности*.

Очень важно выявить и количественно оценить отказы, которые влияют на безопасность работы машины. По американской методике FMECA безопасность системы оценивается вероятностью безотказной работы с учётом двух параллельных показателей: категории последствий и уровня опасности.

Категория последствий оценивает степень серьезности тех последствий, к которым может привести отказ:

– I класс – отказ не приводит к травмированию персонала;

– II класс – отказ приводит к травмированию персонала;

– III класс – отказ приводит к серьезной травме или смерти;

– IV класс – отказ приводит к серьезным травмам или смерти группы людей.

Уровень опасности P_{on} учитывает то время, которое имеет в своем распоряжении персонал для устранения отказа и предотвращения аварии. Чем меньше время T_y, тем выше степень опасности, возникающей от данного отказа. Численно уровень опасности характеризуется величиной

$$P_{on} = e^{-T_y}. \qquad (6.106)$$

Вид отказа, который приводит к аварии без всякого предупреждения персонала ($T_y \to 0$), характеризуется высшим уровнем опасности, равным единице.

Противоположным по характеру является отказ, на устранение которого всегда имеется необходимое время ($T_y \to \infty$) и опасности аварии не возникает. В этом случае уровень опасности равен нулю.

Допустимую вероятность отказа выбирают с учётом влияния указанных выше факторов и вероятности отказа всей системы. Установлены четыре класса вероятностей q отказа данного элемента как части вероятности Q отказа всей системы:

1) $q < 0{,}01Q$;

2) $0{,}01Q < q < 0{,}05Q$;

3) $0{,}05Q < q < 0{,}1Q$;

4) $q > 0{,}1Q$.

Определять оптимальные требования к надёжности машины и её элементам необходимо потому, что повышение отдельных показателей надёжности, как правило, связано с возрастанием экономических

затрат на разработку и производство и уменьшением расходов на ремонт и техническое обслуживание. Для оптимизации требований к показателям надёжности необходимо на основе анализа условий производства и принципов эксплуатации выбрать показатели эффективности (стоимость изготовления, производительность, безотказность, долговечность, ремонтопригодность и др.).

Основными показателями эффективности машины являются производительность и экономичность, т. е. затраты на выполнение заданных функций. Если в качестве показателя эффективности принять затраты, производство и эксплуатацию, то можно получить взаимосвязь вероятности безотказной работы с затратами.

С повышением надёжности увеличиваются затраты в процессе проектирования, изготовления машин, с одной стороны, и снижаются затраты на эксплуатацию вследствие уменьшения числа отказов, с другой. Эти две противоположные тенденции и создают предпосылки для появления экстремума показателей экономической эффективности, которому соответствует определённое (оптимальное) значение вероятности безотказной работы.

Таким образом, задача нормирования надёжности сводится к исследованию суммарных приведенных затрат в зависимости от вероятности безотказной работы.

Функциональная взаимосвязь приведенных затрат с вероятностью безотказной работы имеет вид

$$Э\left[P(t)\right] = C_{П}\left[P(t)\right] + C_{Э}\left[P(t)\right], \qquad (6.107)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $C_{П}\left[P(t)\right]$ – приведенные затраты, связанные с обеспечением разработки и производства машины с вероятностью безотказной работы $P(t)$; $C_{Э}\left[P(t)\right]$ – ежегодные приведенные затраты, связанные с техническим обслуживанием во время эксплуатации.

Затраты, связанные с проектированием и производством машины, вычисляются по формуле

$$C_{П} = C_{ПО} + C_{К} + C_{Г.Н}, \qquad (6.108)$$

где $C_{ПО} = (\rho + E)\cdot C_{С}$ – приведенные затраты на производство машины ($\rho = 1/T$ – нормативный коэффициент на реновацию); T – срок службы; E – нормативный коэффициент капитальных вложений; $C_{С}$ – себестоимость производства машины; $C_{К}$ – годовые амортизационные

расходы на капитальные вложения; $C_{Г.Н}$ – годовые накладные расходы.

Указанные составляющие расходов зависят от уровня вероятности безотказной работы.

Затраты, связанные с техническим обслуживанием в процессе эксплуатации, рассчитываются по формуле

$$C_Э\left[P(t)\right] = C_{Т.О} + C_Р + C_{П.Р}, \qquad (6.109)$$

где $C_{Т.О}$ – затраты на проведение планового технического обслуживания; $C_Р$ – затраты на ремонт после появления отказов; $C_{П.Р}$ – затраты, связанные с простоем.

При $C_Э = [P(t)] = \min$ достигается оптимальный (нормированный) уровень вероятности безотказной работы, обеспечивающий минимальные суммарные затраты на производство и эксплуатацию машины.

Таким образом задача нормирования надёжности сводится к исследованию суммарных приведенных затрат в зависимости от вероятности безотказной работы (рис. 6.41).

Из графика (рис. 6.41) чётко видно, что с повышением вероятности безотказной работы повышаются и затраты на обеспечение надёжности, причём повышаются нелинейно, в соответствии со степенной зависимостью. Например, применительно к автомобилю стоимость каждого следующего гарантированного километра пробега существенно выше, чем предыдущего.

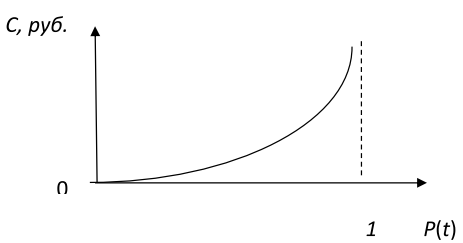


Рис. 6.41 – Зависимость затрат от повышения вероятности безотказной работы изделия

Следует иметь в виду, что показатели надёжности вступают в противоречие с другими показателями качества (стоимостью, эффек-

тивностью и др.). Тесная связь показателей надёжности с эффективностью применения свидетельствует о том, что в общем случае задача нормирования надёжности не может рассматриваться изолированно. Её решение, точно так же как и решение задачи нормирования других показателей, должно основываться на анализе эффективности. Под эффективностью будем понимать выполнение в течение назначенного периода наибольшего объёма работ с минимальными материальными затратами.

В общем виде показатель эффективности может быть выражен зависимостью

$$Э = C_{\Sigma} / D_{\Sigma}, \qquad (6.110)$$

где $C_{\Sigma} = C(x_j, z_j, y_j, t)$ – функция полной величины целевой отдачи всей совокупности изделий данного вида; D_{Σ} – полные затраты труда на проектирование, изготовление и эксплуатацию изделия; x_j – организационные факторы (интенсивность создания, производства и эксплуатации); y_j – технические характеристики; z_j – технико-экономические факторы (технологичность, ремонтопригодность и др.).

При исследовании показателя эффективности изделия на этапе проектирования должна рассматриваться взаимосвязь условий, определяющих эффективность (рис. 6.42).

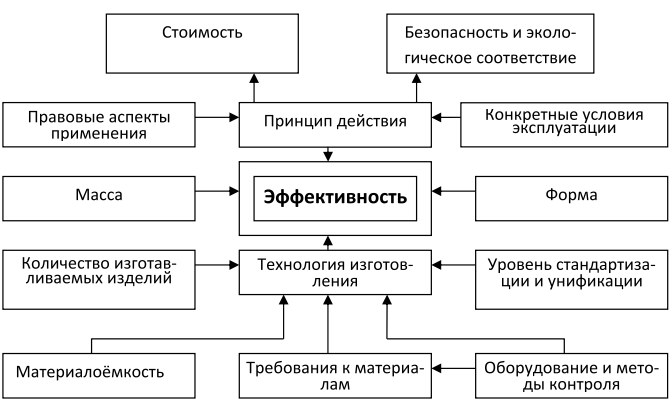


Рис. 6.42 – Взаимосвязь условий эффективности

Если представленную схему, показанную на рисунке 6.42, взаимосвязи условий представить в виде аналитических зависимостей, мы получим математическую модель критерия эффективности и, осуществив её оптимизацию, определим количественные показатели надёжности.

Основными показателями эффективности объекта являются показатели производительности и экономичности. Кроме того, должны быть введены и другие граничные условия в зависимости от назначения объекта, например ограничения массы, габаритов и др.

Определение оптимальных требований к надёжности объекта связано с тем, что вместе с повышением показателей надёжности, как правило, происходит возрастание затрат на НИОКР и производство и уменьшение расходов на ремонт и техническое обслуживание.

Рассмотрим связь показателей эффективности с показателями надёжности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых приводов. В общем случае под показателем эффективности будем понимать критерий, записанный в форме (6.110), или критерий безопасности, например, для пассажирского подвижного состава, подъёмно-транспортных машин и др.

Для невосстанавливаемых объектов выделяют два уровня эффективности. Первый уровень $Э_0$ соответствует исправному состоянию и наблюдается с вероятностью P. Второй уровень эффективности равен нулю и соответствует отказу объекта в период применения.

Эффективность невосстанавливаемого объекта выражается зависимостью

$$Э_1 = Э_0 \cdot P. \qquad (6.111)$$

В силу того, что отказы происходят в случайные моменты времени и моменты их возникновения можно прогнозировать только в вероятностном аспекте, выполнение производственных задач может быть обеспечено при введении в эксплуатацию избыточного числа объектов или их конструктивных составляющих.

Вероятность выполнения задачи при применении i-го объекта независимо от результатов применения предыдущих i–1 объектов определяется зависимостью

$$Э_N = 1 - \left(1 - Э_0 P\right)^N, \qquad (6.112)$$

где N – число изделий.

По существу, показатель $Э_N$ является показателем производительности N объектов.

Из зависимости (6.112) можно определить:

$$N = \ln(1 - Э_N) / \ln(1 - Э_0 P). \qquad (6.113)$$

Если на $Э_N$ наложить определённые количественные требования в виде $Э_{N_0}$, то можно ввести показатель экономичности системы по формуле

$$D = C_1 N = C_1 \ln(1 - Э_{N_0}) / \ln(1 - Э_0 P), \qquad (6.114)$$

где C_1 – стоимость одного изделия.

При проектировании нового объекта необходимо оценить его экономическую целесообразность по сравнению с предшествующими, т. е. относительный показатель экономичности:

$$\overline{D} = (D_И - D_П) / D_И, \qquad (6.115)$$

где $D_И$ – показатель экономичности находящегося в эксплуатации изделия; $D_П$ – показатель экономичности принимаемого к разработке изделия.

Для того чтобы корректно использовать выражения (6.114) и (6.115), необходимо установить зависимость C_1 от уровня надёжности, т. е. получить функцию

$$C_1 = C_0(1 - P)^{-\alpha}, \qquad (6.116)$$

где C_0 и α – параметры, которые могут быть определены по статистическим данным.

Подставив зависимости (6.116) и (6.114) в уравнение (6.115), получим зависимость для определения показателя экономичности:

$$\overline{D} = \frac{D_И - C_0(1 - P)^{-\alpha} \ln(1 - Э_{N_0}) / \ln(1 - Э_0 P)}{D_И}. \qquad (6.117)$$

Оптимальное значение показателя надёжности $P_{опт}$ определяется из условия

$$\frac{\partial D}{\partial P} = 0. \qquad (6.118)$$

Вычислив производную (6.118) по функционалу (6.117), после преобразований получим равенство

$$\frac{Э_0}{\alpha}+\frac{\left(1-P_{опт}Э_0\right)\ln\left(1-Э_0P_{опт}\right)}{1-P_{опт}}=0. \qquad (6.119)$$

Таким образом, мы получаем равенство

$$P_{опт}=P\left(Э_0,\alpha\right). \qquad (6.120)$$

Для выявления функциональной связи (6.120) произведем расчёт значений $P_{опт}$ по уравнению (6.119) при различных значениях α и $Э_0$.

Результаты расчёта $P_{опт}$ представлены на рисунке 6.43, из которого следует, что с увеличением $Э_0$ при α = const величина $P_{опт}$ возрастает, т. е. чем выше показатели производительности объекта, тем выше требования, предъявляемые к его надёжности. Увеличение коэффициента α при $Э_0$ = const соответствует росту материальных затрат на повышение надёжности.

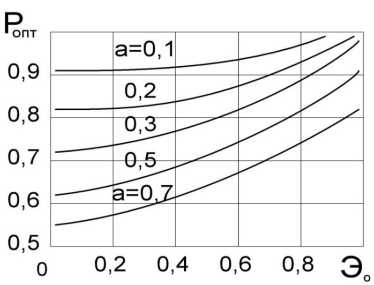


Рис. 6.43 – Зависимость показателя $P_{опт}$ от α и $Э_0$

Для восстанавливаемых объектов показатель эффективности определяется затратами средств на их применение. Предположим, что объект приносит доход $\overline{C}_1$ за единицу времени пребывания в исправном состоянии, а когда он отказывает, то на его ремонт и восстановление в единицу времени расходуются средства $\overline{C}_2$. Время до появления отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с интенсивностью отказов λ, а время восстановления характеризуется параметром восстановления μ.

Через $C_1(t)$ обозначим полный ожидаемый доход за время t, при $t = 0$, $C_1(0)$ – начальные затраты на создание объекта, $C_2(t)$ – предполагаемый доход для объекта, который в момент $t = 0$ находился в неработоспособном состоянии, $C_2(0) = C_1(0)$.

Пусть в интересующий нас момент времени t объект находился в работоспособном состоянии, а в течение интервала dt он может остаться исправным либо отказать. Если объект исправен в течение dt, то от его применения имеем доход $\overline{C}_1 dt$ плюс ожидаемый доход $C_1(t)$, который он принесет за время t.

Вероятность исправного состояния за dt равна $1 - \lambda dt$. Объект также может отказать за dt с вероятностью λdt. В результате суммарный доход от использования по назначению исправного объекта за интервал $t + dt$ определяется зависимостью

$$C_1(t+dt) = (1-\lambda dt)\left[\overline{C}_1 dt + C_1(t)\right] + \lambda dt C_2(t). \qquad (6.121)$$

Теперь допустим, что в момент времени t объект находился в неработоспособном состоянии. Тогда в течение dt он может оставаться в неисправном состоянии или может быть восстановлен. Применяя те же логические построения, что и ранее, получим выражение

$$C_2(t+dt) = (1-\mu dt)\left[C_2(t) - \overline{C}_2(t)\right] + \mu dt C_1(t). \qquad (6.122)$$

Преобразуем уравнения (6.121), (6.122) и, пренебрегая членами с множителем $(dt)^2$, получим систему уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}C_1(t) = \overline{C}_1 - \lambda[C_1(t) - C_2(t)], \\ \dfrac{d}{dt}C_2(t) = \overline{C}_2 - \mu[C_1(t) - C_2(t)]. \end{cases} \qquad (6.123)$$

Система (6.123) описывает изменение показателя экономичности объекта при эксплуатации.

Применив преобразование Лапласа к системе (6.123), получим алгебраические уравнения относительно оператора s:

$$\begin{cases} sC_1(s) - C_1(0) = \dfrac{1}{s}\overline{C}_1 - \lambda[C_1(s) - C_2(s)], \\ sC_2(s) - C_2(0) = \dfrac{1}{s}\overline{C}_2 - \mu[C_1(s) - C_2(s)] \end{cases} \qquad (6.124)$$

В результате совместного решения системы (6.124) получим выражения:

$$C_1(s) = \frac{(s+\mu)\overline{C}_1 - \lambda \overline{C}_2}{s^2(s+\lambda+\mu)} + \frac{(s+\mu)C_1(0) + \lambda C_2(0)}{s(s+\lambda+\mu)}, \qquad (6.125)$$

$$C_2(s) = \frac{(s+\lambda)\overline{C}_2 - \mu C_1}{s^2(s+\lambda+\mu)} + \frac{(s+\mu)C_1(0) + \lambda C_2(0)}{s(s+\lambda+\mu)}. \qquad (6.126)$$

Применим обратное преобразование Лапласа к уравнениям (6.125) и (6.126). Отметим, что в преобразовании функции $C_2(s)$ нет необходимости, поскольку эксплуатация объекта всегда начинается с исправного состояния.

Обратное преобразование функции (6.125) имеет вид

$$C(t) = \overline{C}_1\left\{\frac{\mu}{\lambda+\mu}t + \frac{\lambda}{(\lambda+\mu)^2}\left[1-e^{-(\lambda+\mu)t}\right]\right\} - \overline{C}_2\left\{\frac{\lambda}{\lambda+\mu}t + \frac{\lambda}{(\lambda+\mu)^2}\left[1-e^{-(\lambda+\mu)t}\right]\right\} \qquad (6.127)$$

Сомножители при $\overline{C}_1$ и $\overline{C}_2$ имеют размерность времени. Первое слагаемое характеризует рост доходов с течением времени при условии пребывания объекта в исправном состоянии. При $\lambda = \infty$ первое слагаемое равно нулю, с уменьшением λ оно монотонно возрастает до предельного случая $\lambda = 0$, когда доходы пропорциональны времени эксплуатации. Второе слагаемое характеризует расходы на восстановление объекта. При $\lambda = 0$ (объект безотказен) эти расходы равны нулю и с ростом λ увеличиваются.

Противоположное направление изменения слагаемых в функции при изменении λ приводит к тому, что $C(t)$ имеет оптимум по показателю λ; аналогичный результат получается и при рассмотрении в качестве переменной интенсивности восстановления μ. В связи с этим требования, предъявляемые к нормативным показателям надёжности, удовлетворяются путём оптимизации значений λ и μ, что достигается путём совместного решения уравнений:

$$\partial C(t)/\partial \lambda = 0; \qquad \partial C(t)/\partial \mu = 0. \qquad (6.128)$$

Изложенная методика в первом приближении позволяет произвести нормирование показателей надёжности объекта по заданным параметрам эффективности.

Нормирование ресурса объекта производится по критерию экономической эффективности. Оптимальный ресурс определяется по минимуму затрат на производство и эксплуатацию.

Суммарные приведенные удельные затраты на единицу наработки объекта складываются из удельных затрат на его приобретение $C_{пр}$, эксплуатацию $C_э$ и техническое обслуживание $C_т$, рассчитываются по формуле

$$C_{уд} = C_{пр} + C_э + C_т . \qquad (6.129)$$

Приведенные удельные затраты на приобретение объекта могут быть определены по зависимости

$$C_{пр} = Ck/T , \qquad (6.130)$$

где C – себестоимость изготовления объекта; k – коэффициент перехода от себестоимости к стоимости приобретения; T – время работы.

Средние затраты на эксплуатацию за время работы рассчитываются по формуле

$$C_э = \frac{1}{T}\int_0^T C_э(t)dt , \qquad (6.131)$$

где $\overline{C}_э = \beta t^{\alpha}$ – затраты на эксплуатацию; β, α – постоянные коэффициенты, определяемые условиями и технологией эксплуатации.

С учётом введенных обозначений приведенные удельные затраты на эксплуатацию определяются зависимостью

$$C_э = \frac{1}{T}\int_0^T \beta t^{\alpha} dt = \frac{\beta}{\alpha+1} T^{\alpha} . \qquad (6.132)$$

Приведенные удельные затраты на техническое обслуживание не зависят от ресурса: C_T = const. Зависимость приведенных затрат от времени работы приведена на рисунке 6.44.

Поскольку наработка t влияет на составляющие затрат $C_э$ и $C_{пр}$ в противоположных направлениях, то в точке их пересечения имеет место минимум удельных затрат от времени работы, т. е. оптимальный ресурс.

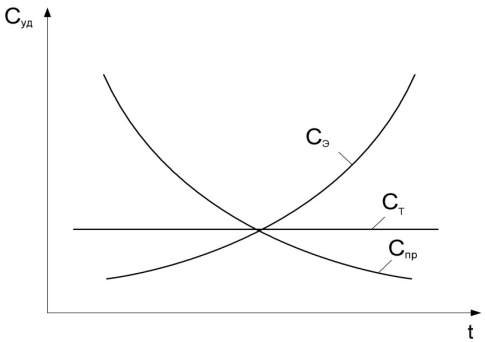


Рис. 6.44 – Зависимость приведенных затрат от наработки

Оптимальный ресурс до капитального ремонта определяется целевой функцией

$$C_{уд} = \min\left(C_{пр} + C_э + C_T\right),$$

или (6.133)

$$C_{уд} = \min\left(\frac{C_k}{T} + \frac{\beta}{\alpha - 1}T^{\alpha} + C_T\right).$$

Оптимальный ресурс рассчитывается путём вычисления частной производной $C_{уд}$ из уравнения

$$\frac{\partial C_{уд}}{\partial T} = -\frac{Ck}{T_p^2} + \frac{\beta\alpha}{\alpha - 1}T^{\alpha-1} = 0,$$

$$\text{или} \quad T_p = \sqrt[\alpha+1]{\frac{(\alpha+1)Ck}{\alpha\beta}}. \qquad (6.134)$$

Таким образом, если по статистическим данным определены коэффициенты α и β, то можно приближенно определить оптимальный нормированный ресурс объекта до капитального ремонта.

Показатели надёжности любого объекта безусловно определяются показателями надёжности его элементов. В связи с этим задачу назначения показателей надёжности конструктивных составляющих объекта можно сформулировать следующим образом: необходимо определить такие значения показателей надёжности основных элементов объекта, чтобы при условии минимальных затрат можно было

создать и эффективно эксплуатировать объект с показателями надёжности не менее заданных (нормированных).

Для этого необходим функциональный анализ объекта и определение его основных конструктивных составляющих (элементов), лимитирующих надёжность. Затем необходимо определить целевую функцию, в качестве которой принимается зависимость средних удельных затрат на производство и эксплуатацию элементов. Для формирования целевой функции необходимо обработать данные по затратам на производство и эксплуатацию элементов и аппроксимировать функцию затрат аналитическим выражением вида $C_i = C_i(P_i)$.

Тогда целевая функция может быть представлена в виде

$$C = \sum_{1}^{N} \overline{C}_i(P_i) = \min. \qquad (6.135)$$

При этом в качестве функции ограничения принимается зависимость вида

$$\prod_{1}^{N} P_i \geq P_{mp}, \qquad (6.136)$$

где P_{mp} – требуемый показатель надёжности объекта.

Для восстанавливаемых объектов функцию затрат на производство и эксплуатацию можно представить в виде формулы

$$C_i = \frac{C_{ai}}{C_{ui}} \ln \frac{P_{i\infty} - P_{i0}}{P_{i\infty} - P_i}, \qquad (6.137)$$

где C_{ai} – средняя стоимость производства элемента; C_{ui} – стоимость испытаний; P_0 и P_∞ – начальный и предельный показатели надёжности.

Функцию затрат (6.137) в первом приближении можно аппроксимировать зависимостью

$$C_i = a_i \ln\left[b_i \Big/ (P_{i\infty} - P_i) \right], \qquad (6.138)$$

где a_i и b_i – статистические коэффициенты затрат; $P_{i\infty}$ – предельное значение показателя надёжности.

Если представить зависимость (6.138) в виде исходной целевой функции, то последняя будет иметь вид

$$\sum_{1}^{N} a_i \ln\left[b_i \Big/ (P_{i\infty} - P_i) \right] = \min. \qquad (6.139)$$

Нелинейное ограничение (6.136) без заметного снижения точности решения задачи может быть заменено линейным; для этого необходимо прологарифмировать неравенство (6.136). В результате получим неравенство

$$\sum_{1}^{N} \ln P_i \geq \ln P_{mp}. \tag{6.140}$$

Так как P_i и P_{mp} близки к единице, можно принять, что $\ln P_i = -(1 - P_i)$ и $\ln P_{mp} = -(1 - P_{mp})$. В этом случае неравенство (6.140) перепишется в виде неравенства

$$\sum_{1}^{N} (1 - P_i) \leq (1 - P_{mp}). \tag{6.141}$$

Таким образом, задача оптимизации требований к показателям надёжности элементов принимает вид

$$\begin{aligned} &\sum_{1}^{N} a_i \ln \left[b_i \Big/ (P_{i\infty} - P_i) \right] = \min, \\ &\sum_{1}^{N} (1 - P_i) \leq (1 - P_{mp}). \end{aligned} \tag{6.142}$$

Выражение (6.142) представляет собой задачу нелинейного программирования с целевой функцией и линейным ограничением.

Если неравенство в (6.142) заменить равенством, то задача принимает вид

$$\begin{aligned} &\sum_{1}^{N} a_i \ln \left[b_i \Big/ (P_{i\infty} - P_i) \right] = \min; \\ &\sum_{1}^{N} (1 - P_i) = (1 - P_{mp}). \end{aligned} \tag{6.143}$$

В такой форме задача по определению оптимального значения P_{ioon} может решаться методом неопределённых множителей Лагранжа.

Функция Лагранжа на основании (6.143) запишется в виде формулы

$$L = \sum_{1}^{N} a_i \ln \frac{b_i}{P_{i\infty} - P_i} + \lambda \left[(1 - P_{mp}) - \sum_{1}^{N} (1 - P_i) \right], \tag{6.144}$$

где λ – неопределённый множитель Лагранжа.

Условие оптимума функции Лагранжа $\partial L / \partial P_i = 0; \quad i = 1, \bar{N};$ $\partial L / \partial \lambda = 0,$ и в соответствии с (6.143) имеем выражения

$$\begin{aligned} \partial L / \partial P_i &= a_i / (P_{i\infty} - P_i) + \lambda = 0, \\ \partial L / \partial \lambda &= 1 - P_{mp} - \sum_1^N (1 - P_i) = 0. \end{aligned} \tag{6.145}$$

Откуда получаем выражение (6.146) для P_{ioon}:

$$\begin{aligned} \sum_1^N P_{ioon} &= P_{mp} - 1 - N, \\ P_{\text{ioon}} &= P_{i\infty} + a_i / \lambda. \end{aligned} \tag{6.146}$$

Суммируя левую и правую части уравнения при значениях i, изменяющихся в интервале $1 \ldots N$, получим выражения:

$$\sum_1^N P_{ioon} = \sum_1^N P_{i\infty} + \frac{1}{\lambda} \sum_1^N a_i, \tag{6.147}$$

$$\lambda = \sum_1^N a_i \Big/ \left[1 - P_{mp} - \sum_1^N (1 - P_{i\infty}) \right]. \tag{6.148}$$

С учётом (6.148) и (6.146) после элементарных преобразований получим выражение (6.149) для оптимального значения показателя надёжности элемента:

$$P_{ioon} = P_{i\infty} - \bar{f}_i \left[(1 - P_{mp}) - \sum_1^N (1 - P_{i\infty}) \right], \tag{6.149}$$

где $\bar{f}_i = a_i / \sum a_i$.

Уравнение (6.149) можно логически улучшить и одновременно упростить, если вместо вероятности безотказной работы ввести вероятности отказов, тогда получим формулы

$$Q_{Д} = 1 - P_{mp}; \sum_1^N (1 - P_{i\infty}) = Q_{\infty}, \tag{6.150}$$

где $Q_Д$ – допустимая вероятность отказа объекта; Q_∞ – предельно допустимая вероятность отказа.

В результате введения этих обозначений уравнение (6.149) принимает вид

$$P_{ioon} = P_{i\infty} - \bar{f}_i\left(Q_Д - Q_\infty\right). \qquad (6.151)$$

Для выбора номенклатуры показателей надёжности (ПН) объектов необходима их классификация и назначение критериев отказов и предельных состояний (КОПС)

Рекомендуемая здесь классификация является условной и открытой, и для конкретного объекта с учётом его индивидуальных особенностей номенклатура признаков классификации может быть расширена. Применяемые понятия (система и подсистема) рассматриваются только совместно и являются иерархическими уровнями объекта. Например, деталь может рассматриваться как подсистема сборочной единицы и как многофункциональная система с собственными интегральными, комплексными и частными нормируемыми квалиметрическими показателями. Общие классификационные признаки и их частичная детализация применительно к нормированию ПН и КОПС приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Классификация технических систем для нормирования ПН и КОПС

Признак классификации	Детализация признака классификации	Номенклатура и нормы ПН и КОПС
1. Вид объекта		
1.1. Деталь	Подсистема, изготовленная из однородного материала, без применения сборочных операций	ПН и КОПС могут устанавливаться в НТД (технических регламентах, стандартах, ТУ, КД и др.)
1.2. Сборочная единица	Подсистема, составные части которой подлежат соединению между собой	ПН и КОПС устанавливают в НТД
1.3. Комплекс	Система (подсистема), состоящая из двух и более специфицированных подсистем, не соединенных сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных функций	ПН устанавливают в НТД в соответствии с иерархической ступенью подсистемы

Продолжение табл. 6.2

Признак классификации	Детализация признака классификации	Номенклатура и нормы ПН и КОПС
1.4. Комплект	Подсистема, состоящая из двух и более подсистем, не соединенных сборочными операциями и предназначенных для выполнения вспомогательных функций	ПН устанавливают на входящие подсистемы по необходимости
2. Степень ответственности объекта		
2.1. Ответственный	Подсистема, отказы или переходы в предельное состояние которой приводят к тяжелым последствиям (катастрофам, авариям, большому экономическому и другому ущербу)	В НТД устанавливают строго назначенные ПН и КОПС с узкими полями допусков; нормы ПН и КОПС должны учитывать характеристики системы ТОР
2.2. Рядовой	Объект, не обладающий признаками 2.1	Устанавливают групповые и индивидуальные ПН и КОПС
3. Степень ответственности подсистемы		
3.1. Главная	Подсистема, непосредственно выполняющая функции назначения	ПН и КОПС устанавливают по всем необходимым свойствам надёжности
3.2. Вспомогательная	Подсистема, обеспечивающая выполнение функций главной подсистемы	Требования к ПН определяются требованиями к ПН главной подсистемы
4. Применяемость		
4.1. Общая	Подсистема, предназначенная для использования в системах различного назначения	Устанавливаются индивидуальные и групповые ПН и КОПС
4.2. Специальная	Подсистема, предназначенная для использования только в определённых системах	ПН и КОПС устанавливают в соответствии с требованиями главной системы
5. Количество выполняемых функций		
5.1. Однофункциональная	Подсистема, предназначенная для выполнения одной функции назначения	ПН и КОПС могут устанавливаться для конкретной функции
5.2. Многофункциональная	Подсистема, предназначенная для выполнения двух и более различных функций назначения	ПН и КОПС могут устанавливаться по каждой функции или по нескольким группам функций

Продолжение табл. 6.2

Признак классификации	Детализация признака классификации	Номенклатура и нормы ПН и КОПС
6. Количество значимых квалиметрических показателей		
6.1. Одноуровневая	Подсистема, качество функционирования которой оценивается одним значением каждого показателя качества	ПН и КОПС устанавливают для частного или комплексного значения показателя качества
6.2. Многоуровневая	Подсистема, качество функционирования которой оценивается двумя и более значениями показателя качества	ПН и КОПС устанавливают для каждого значения показателя качества
7. Временной режим функционирования		
7.1. С непрерывным режимом	Подсистема, функционирование которой прерывается только для проведения плановых и неплановых операций	ПН и КОПС устанавливаются применительно к назначенному ресурсу
7.2. С циклическим режимом	Подсистема, периоды функционирования и простоя которой чередуются с определённой цикличностью (последовательностью)	В НТД должна быть указана нормативная или расчётная наработка за календарный период (месяц, год и др.)
7.3. С общим режимом	Подсистема, периоды функционирования и простоя которой чередуются различным образом в различных условиях эксплуатации	В НТД должен быть указан метод пересчёта наработки в календарное время
7.4. Разового использования	Подсистема, предназначенная для однократного использования, после которого повторное использование без проведения операций технического, технологического обслуживания и ремонта не предусмотрено	ПН должны характеризовать надёжность однократного использования
8. Принцип ограничения длительности использования		
8.1. С назначенным ограничением	Подсистема, используемая в данной системе по назначению в пределах определённой наработки или календарной продолжительности	Для подсистем специального применения устанавливают ПН, назначенные в НТД на подсистему. Для подсистем общего применения назначенные ПН устанавливают в НТД на систему, в которую входит подсистема

Продолжение табл. 6.2

Признак классификации	Детализация признака классификации	Номенклатура и нормы ПН и КОПС
8.2. С вынужденным ограничением	Подсистема, используемая в данной системе по назначению до моментов возникновения отказа или перехода в предельное состояние	Устанавливаются индивидуальные и групповые ПН и КОПС
9. Связь с ресурсом системы		
9.1. Ресурсная	Подсистема, исчерпание ресурса которой приводит к исчерпанию ресурса системы, составной частью которой она является	ПН должны соответствовать заданным требованиям на систему. КОПС являются критериями предельного состояния системы
9.2. Нересурсная	Подсистема, ресурс которой исчерпывается одновременно с исчерпыванием ресурса системы, составной частью которой она является	Долговечность и ремонтопригодность подсистемы должны обеспечивать долговечность подсистемы, соответствующую ресурсу системы
10. Зависимость и обособленность подсистемы		
10.1. Независимая	Подсистема, работоспособность которой не зависит от работоспособности других связанных с ней подсистем	ПН и КОПС устанавливают по характеристикам подсистемы
10.2. Зависимая	Подсистема, работоспособность которой зависит от работоспособности других связанных с ней подсистем	ПН и КОПС устанавливают с учётом взаимосвязи с системами, от которой зависит её работоспособность
10.3. Конструктивно обособленная	Подсистема, ограниченная одной или несколькими конструктивными единицами (блок, механизм, агрегат)	ПН устанавливают в ТУ
10.4. Функционально обособленная	Подсистема, ограниченная выполняемыми функциями (например, система смазки двигателя)	ПН и КОПС при необходимости устанавливают в НТД на систему, в которую она входит
10.5. Обособленная	Подсистема конструктивно и функционально обособленная (троллейбус с питанием от контактной сети)	ПН и КОПС устанавливают в НТД
10.6. Автономная	Подсистема обособленная и независимая	ПН и КОПС устанавливают в НТД

Продолжение табл. 6.2

Признак классификации	Детализация признака классификации	Номенклатура и нормы ПН и КОПС
11. Факторы, влияющие на снижение ПН		
11.1. Наработка	Подсистема, снижение ПН которой происходит только в процессе функционирования	ПН и КОПС устанавливают по назначенному ресурсу
11.2. Календарная продолжительность эксплуатации	Подсистема, снижение ПН которой происходит только за календарное время	ПН устанавливают по сроку службы
11.3. Наработка и календарная продолжительность эксплуатации	Подсистема, обладающая признаками 11.1 и 11.2 (например, изоляционные материалы)	ПН и КОПС могут устанавливаться и по ресурсу, и по сроку службы
12. Резервирование		
12.1. Резервируемая подсистема	Подсистема, на случай отказа которой предусмотрен резерв	ПН устанавливают с учётом наличия резерва
12.2. Основная подсистема	Подсистема, выполняющая функции назначения при отсутствии в ней отказов	ПН устанавливают с учётом требований к ПН системы
12.3. Резервная подсистема	Подсистема, выполняющая функции назначения при отказе основной	То же
13. Ремонтопригодность		
13.1. Ремонтируемая подсистема	Подсистема, ремонт которой предусмотрен в НТД или КД	Показатели ремонтопригодности и комплексные ПН устанавливают по согласованию с заказчиком
13.2. Неремонтируемая подсистема	Подсистема, ремонт которой не предусмотрен в НТД или КД	Показатели ремонтопригодности не устанавливаются
13.3. Восстанавливаемая подсистема	Подсистема, восстановление которой предусмотрено в НТД и КД	Показатели ремонтопригодности и комплексные ПН устанавливают по согласованию с заказчиком
13.4. Невосстанавливаемая подсистема	Подсистема, восстановление которой не предусмотрено в НТД и КД	Показатели ремонтопригодности не устанавливаются

Продолжение табл. 6.2

Признак классификации	Детализация признака классификации	Номенклатура и нормы ПН и КОПС
13.5. Обслуживаемая подсистема	Подсистема, обслуживание которой предусмотрено в НТД и КД	Показатели продолжительности (трудоемкости) ТО устанавливаются в НТД и КД по согласованию с заказчиком
14. Сохраняемость объекта		
14.1. Хранимый	Объект, для которого предусмотрен режим хранения	Устанавливаются показатели сохраняемости по согласованию с заказчиком
14.2. Нехранимый	Объект, для которого не предусмотрен режим хранения	Показатели сохраняемости не устанавливают
14.3. Транспортируемый	Объект, подвергающийся транспортированию определёнными видами транспорта	Устанавливают показатели сохраняемости при транспортировании конкретными видами транспорта
14.4. Нетранспортируемый	Объект, не подлежащий транспортированию	Показатели сохраняемости при транспортировании не устанавливают
15. Назначение, вид производства и принадлежность по изготовлению объекта		
15.1. Основного производства	Объект, предназначенный для поставки (реализации)	ПН и КОПС устанавливают в соответствии с НТД, по которой изготавливается объект
15.2. Вспомогательного производства	Объект, предназначенный только для собственных нужд предприятия-изготовителя	ПН могут не устанавливаться
15.3. Собственного производства	Объект, изготовленный предприятием-поставщиком	ПН и КОПС устанавливают по всем необходимым свойствам надёжности
15.4. Покупной	Подсистема, не изготовляемая предприятием-поставщиком, а получаемая им в готовом виде, кроме получаемых в порядке кооперирования	ПН задают с учётом требований к ПН системы, либо выбирают подсистему, ПН которой отвечают этим требованиям
15.5. Получаемый в порядке кооперирования	Подсистема, изготовленная не на предприятии-поставщике, по конструкторской документации, входящей в комплект системы	ПН и КОПС задают с учётом требований к ПН системы

Предлагаемые признаки классификации составляют полную систему внутри группировки и, как правило, не пересекаются, но некоторые признаки могут исключать другие. Например, для нерезервируемой подсистемы некорректным является признак принадлежности к основной или резервной подсистеме; признак главный или вспомогательный может иметь система, содержащая подсистемы, и т. д. Отдельные признаки подсистемы могут совпадать с признаками системы, в которую входят, однако в ряде случаев они могут различаться вплоть до противоположных. Например, система, состоящая из неремонтируемых подсистем, может быть ремонтируемой.

Таким образом, нормирование надёжности машин является комплексной задачей, включающей следующие основные этапы:

– выбор наиболее подходящих показателей надёжности для рассматриваемой конструкции машины;

– обоснование численных значений показателей надёжности машины в целом;

– оптимальное распределение избыточности конструкции машины (запаса надёжности) между её подсистемами.

В качестве примера рассмотрим обобщённый алгоритм назначения вероятности безотказной работы (ВБР) машины за определённый промежуток времени. Обозначим этот показатель надёжности через R. Выходной показатель эффективности эксплуатации машины обозначим через E, а через $R_{\min}$ – минимальный уровень ВБР, при котором технически допустимо использование машины. Через $C(R)$ обозначим расходы на повышение ВБР до уровня R, которые ограничены величиной $C_{огр}$.

Общая схема нормирования значения ВБР представлена на рисунке 6.45.

Если эффект E от эксплуатации машины соизмерим с затратами C на повышение её ВБР, то рекомендуется последовательность решения задачи, условно обозначенная номерами элементов блок-схемы (рис. 6.45):

$$1–2–2'–4–5–6.$$

В этом случае оптимальное значение ВБР$=R_{опт}$ получают из решения следующей задачи на условный экстремум:

$$\frac{E(R)}{C(R)} \to \max; \qquad (6.152)$$

$$\text{при} \quad R \geq R_{\min}; \quad C(R) \leq C_{огр}, \qquad (6.153)$$

где $E(R)$ – непрерывная и неубывающая функция, ограниченная каким-то номинальным значением E_0; $C(R)$ – неограниченно-возрастающая функция.

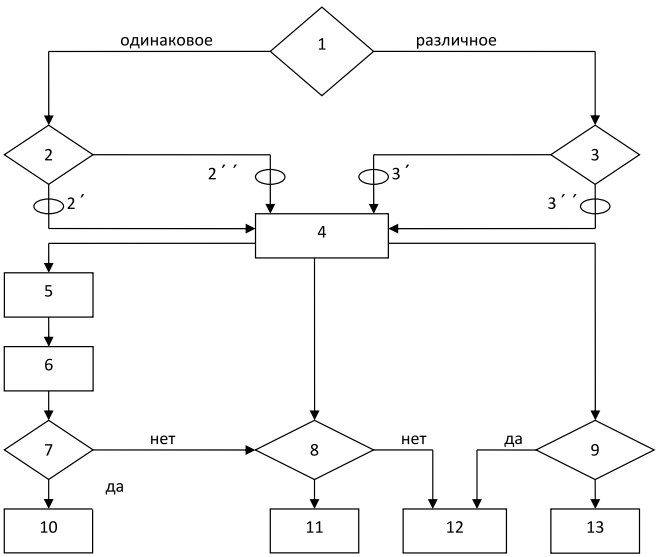


Рисунок 6.45 – Блок-схема нормирования надёжности машин: *1* – смысловое содержание E и C; *2* – ущерб от отказов; *3* – затраты на повышение надёжности; *4* – построение зависимости $C(E)$; *5* – построение функции E(R); *6* – определение $R_{опт}$; *7* – $C(R_{опт}) \le C_{огр}$; *8* – $R(C_{огр}) \ge R_{\min}$; *9* – $R(C_{огр}) < R_{\min}$; *10* – принимается $R_{опт}$; *11* – принимается $R(C_{огр})$; *12* – нет решения; *13* – принимается $R_{экс}$.

Если ущерб от возникновения отказов велик по сравнению с затратами на повышение ВБР, то нет необходимости в поиске $R_{опт}$, и решение начинается с определения $R(C_{огр})$. Последовательность решения задачи в этом случае: 1–2–2"–4–8.

Если эффект E от эксплуатации и затраты на повышение безотказности C – величины различного смыслового содержания, то, как и для предыдущего варианта, следует стремиться к повышению ВБР до тех пор, пока не будут исчерпаны возможности изготовителя. В этом случае шифр варианта: 1–3–3'–4–8.

В конструкции любой машины имеются подсистемы, лимитирующие её безотказность. Если отказы этих подсистем не приводят к катастрофическим последствиям, то оптимальный уровень ВБР существует и он находится в области реальных значений. Однако нередки случаи, когда вычислить этот уровень, исходя из сопоставления эффекта и затрат, не представляется возможным. Тогда проектный уровень безотказности рекомендуется определять экспертным методом. В этом случае шифр варианта: 1–3–3"–4–9.

Очевидно, решение поставленной задачи требует от заказчика и поставщика машин постоянного обмена информацией. При этом необходимо отметить, что в задачах нормирования показателей надёжности ни производственная, ни эксплуатационная информация не могут быть использованы в исходном виде – в форме массивов данных. Такую информацию необходимо подвергнуть статистической обработке с обязательным применением факторного анализа в силу того, что на эксплуатационные показатели надёжности влияет большое количество факторов организационного, конструкционного, экономического, социального характера, без учёта которых, например, не представляется возможным обосновать даже при наличии необработанных данных по эксплуатации машины численное значение величины $R_{\min}$.

В практике нормирования показателей безотказности и других показателей надёжности машин принят следующий порядок подготовки исходных данных:

– в зависимости от модели (модификации) машины и/или предприятия-изготовителя парк машин рассматриваемого типа разбивается на n групп;

– машина из i-й группы $\left(i=\overline{1,n}\right)$ отождествляется с себестоимостью c_i её изготовления. При этом следует иметь в виду, что достоверные данные о себестоимости изготовления машин для потребителя являются, как правило, недоступными. Но поскольку нас интересует лишь функциональная зависимость $C(R)$, то в первом приближении допустимо вместо себестоимости изготовления машины исполь-

зовать её рыночную цену. Обозначим через C_1, C_2, …, C_n затраты на приобретение машин, входящих в каждую из n групп;

– сгруппировав данные об отказах (виды отказов, моменты возникновения, причины, затраты на устранение последствий отказов) по рассматриваемым группам машин и обработав их с применением рассмотренных здесь методов математической статистики, получим значения ВБР машин указанных модификаций R_1, R_2, …, R_n;

– далее необходимо определить оптимальную себестоимость $f(l_{ij})$ единицы наработки машины. Под себестоимостью единицы наработки машины i-й группы f_i, допустимо понимать величину E_i. В результате формируем последовательность E_1, E_2, …, E_n для рассматриваемых конструкций машин;

– с помощью известных методов интерполяции получаем функциональные зависимости для $C(R)$, $E(R)$ *и* $f(c)$;

– минимально допустимый уровень безотказности машины $R_{\min}$ определяется в результате анализа следующих независимых случайных величин: ξ_1 – наработка до возникновения отказа, характеризуемого как функциональный, тяжёлый, полный; ξ_2 – наработка машины до возникновения параметрического отказа, при котором хотя бы один из параметров функционирования изменяется в недопустимых пределах. Обозначим через $\overline{C}_1(t)$ и $\overline{C}_2(t)$ их функции распределения соответственно. Тогда случайная величина $\xi = min(\xi_1, \xi_2)$ соответствует величине $R_{\min} = \overline{C}_1(t)\overline{C}_2(t)$, где $\overline{C}_1(t)$ определяется тем его значением, который соответствует параметру, характеризующему, безопасность эксплуатации машины. Оценку для $\overline{C}_2(t)$ получают в результате анализа эксплуатационной информации;

– величину $C_{огр}$ определяем из решения уравнения

$$f'(c) = 0. \qquad (6.154)$$

Таким образом, используя указанный алгоритм получения исходных данных, нетрудно по приведенной методике обосновать нормируемый уровень надёжности машины в целом и её подсистем.

Переходим к решению третьей задачи нормирования безотказности: формирование уровней требований, которые необходимо предъявить к безотказности подсистем машины с тем, чтобы её без-

отказность была бы не менее R_0 и при этом обеспечивался минимум себестоимости её изготовления.

Если в качестве R_0 взять определённый по изложенной методике нормируемый уровень безотказности, то следующей задачей будет оптимальное распределение заложенного в машину запаса надёжности между её подсистемами.

Задача распределения требований к безотказности подсистем применительно к машине, состоящей из s взаимодействующих статистически независимых составных частей, формулируется как задача условной оптимизации, где в качестве критерия оптимизации используется выражение

$$\sum_{i=1}^{s} c_{ij} \to \min, \tag{6.155}$$

а в качестве ограничения:

$$\prod_{i=1}^{s} R_{ij} \geq R_0, \tag{6.156}$$

где c_{ij} – стоимость j-й модификации i-го элемента конструкции; R_{ij} – показатель безотказности j-й модификации i-го элемента конструкции машины.

Итак, по каждому элементу машины имеется определённая совокупность его модификаций. Требуется остановиться на тех модификациях элементов конструкции, при которых выполнялись бы условия (6.155) и (6.156). Для решения этой задачи используют дискретный вариант метода динамического программирования, который предлагается реализовать как последовательность следующих этапов:

– формирование возможных вариантов исполнения каждой из составных частей машины;

– упорядоченный перебор этих вариантов;

– последовательной сборки машины из её составных частей.

Упорядоченный перебор вариантов исполнения составных частей основывается именно на принципе оптимальности метода динамического программирования, когда используется последовательная процедура минимизации на каждом шаге. При этом по каждой i-й модификации любой составной части машины необходимо иметь пару $C_i – R_i$, т. е. «стоимость – безотказность».

6.7. Экономический аспект надёжности

Повышение показателей надёжности продукции должно осуществляться с учётом экономической целесообразности, так как границы повышения показателей надёжности определяются в конечном итоге не только совокупностью желаемых технических параметров, но и их экономической эффективностью. Это объясняется тем, что современный уровень развития техники и технологий позволяет достичь практически любых показателей качества и надёжности изделия, и все дело сводится к затратам на достижение поставленной цели. Эти затраты могут быть столь высоки, что эффект от повышения надёжности объекта не возместит их, и суммарный результат от проведенных мероприятий будет отрицательным.

Часто реализация мероприятий по повышению надёжности может и не требовать существенных затрат, а достигаться, например, методами оптимизации. Однако и в этом случае необходимо проводить сравнение различных вариантов достижения требуемого уровня надёжности по условию получения наибольшего суммарного экономического эффекта с учётом затрат в сферах производства и эксплуатации объекта и того положительного экономического эффекта, который дает его использование по назначению. В общем случае изменение во времени суммарного экономического эффекта при эксплуатации объекта складывается под влиянием двух основных факторов, что наглядно иллюстрируется рисунком 6.46.

С одной стороны, необходимо учитывать *затраты на изготовление* нового объекта $Q_и$, включая его проектирование, изготовление, испытание, отладку, транспортировку к месту работы и другие затраты, а также *затраты на эксплуатацию* $Q_э$, включая техническое обслуживание, ремонт, профилактические мероприятия. Эти затраты $Q_и + Q_э$ являются отрицательными в балансе эффективности.

С другой стороны, работа объекта дает *положительный экономический эффект* $Q_р$ (прибыль) в зависимости от его целевого назначения, например для автомобиля – в результате перевозки грузов или пассажиров.

Изменение $Q_э$ в функции времени имеет тенденцию к возрастанию, так как старение отдельных элементов объекта приводит к необходимости вкладывать все большие средства для восстановления утрачиваемых свойств. Изменение $Q_р$ во времени, наоборот, имеет тенденцию к уменьшению интенсивности роста, так как более частые

простои объекта в ремонте и техническом обслуживании снижают его производительность.

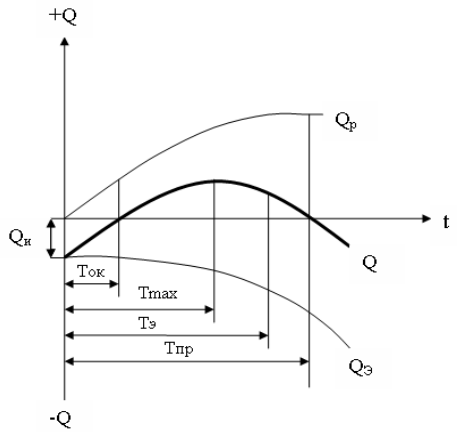


Рис. 6.46 – Изменение экономической эффективности машины во времени

Поэтому кривая суммарной эффективности (6.157) имеет максимум и дважды пересекает ось абсцисс *t:*

$$Q(t) = Q_u + Q_э(t) + Q_p(t). \qquad (6.157)$$

При возрастании Q период времени $t = T_{ок}$, при котором $Q_u + Q_э = Q_p$ будет являться сроком окупаемости средств, вложенных при изготовлении. Начиная с этого момента объект приносит прибыль. Однако прирост полученного эффекта постепенно снижается из-за возрастания эксплуатационных затрат до $t = T_{пр}$, когда снова $Q_u+Q_э=Q_p$. При t, превышающем $T_{пр}$, затраты на эксплуатацию больше того экономического эффекта, который может быть обеспечен. Длительность экономически целесообразной эксплуатации объекта $T_э$ находится в диапазоне между T_{max} и предельным сроком службы $T_{пр}$: $T_{max}< T_э< T_{пр}$.

Выбор варианта машины с позиций надёжности должен определяться сравнением затрат на изготовление и эксплуатацию объекта с тем экономическим эффектом, который он сможет обеспечить. Например, как видно из рисунка 6.46, начальная стоимость машины

№ 2 выше, чем машины № 1, но за счёт показателей производительности и надёжности она дает больший экономический эффект и её целесообразно эксплуатировать более продолжительный срок.

Экономический показатель надёжности $K_э$ определяется как отношение суммы всех затрат, связанных с изготовлением $Q_и$ и эксплуатацией $Q_э$ объекта к длительности его эксплуатации Тэ:

$$K_э = \frac{Q_и + Q_э}{T_э}. \quad (6.158)$$

Следует стремиться к минимизации этого показателя за счёт рационального распределения капиталовложений между сферами производства и эксплуатации.

Затраты на изготовление нового объекта складываются из двух величин:

$$Q_и = Q_п + Q_н, \quad (6.159)$$

где $Q_п$ – постоянные затраты, не зависящие от требований надёжности; $Q_н$ – переменная составляющая затрат, обусловленная требованиями надёжности (цена надёжности).

Во многих случаях зависимость для цены надёжности имеет степенной характер и $Q_н$ определяется по эмпирической формуле

$$Q_н = Q_{но} (T / T_о)^a, \quad (6.160)$$

где $Q_{но}$ – цена надёжности аналога или прототипа; T – наработка на отказ проектируемого изделия; $T_о$ – наработка на отказ прототипа; a – эмпирический показатель, характеризующий уровень прогрессивности производства с точки зрения возможностей повышения надёжности объекта (обычно находится в пределах от 0,5 до 1,5).

Экономическая эффективность повышения показателей надёжности продукции представляет собой экономию живого и овеществленного труда на протяжении всего жизненного цикла объекта с учётом затрат (единовременных и текущих), необходимых для повышения надёжности.

Анализу экономической эффективности подлежат объекты с улучшенными единичными или комплексными показателями любой из групп: безотказность, долговечность, ремонтопригодность, сохраняемость.

Экономический эффект от повышения надёжности машин составляет разность между выраженной в денежной форме экономией всех производственных ресурсов, полученной предприятием в ре-

зультате проведения мероприятий по повышению надёжности, осуществляемых на всех стадиях жизненного цикла изделий.

Показателями экономической эффективности являются:

– годовой экономический эффект;

– коэффициент экономической эффективности (срок окупаемости).

Экономический эффект от повышения надёжности определяется методом сравнительной экономической эффективности. В большинстве случаев сравниваются два объекта – базовый и с улучшенными показателями надёжности. Сравниваемые величины приводятся в сопоставимый вид по времени и производительности. Лучшим считается вариант повышения надёжности, обеспечивающий наибольшую величину годового экономического эффекта по сравнению с вариантом, принятым за базу сравнения.

При расчётах экономической эффективности все технико-экономические показатели сравниваемых вариантов должны быть приведены в сопоставимый вид по фактору времени.

Расчёт экономической эффективности повышения надёжности проводится на всю номенклатуру и весь объём выпуска продукции, для которой реализуются мероприятия по повышению надёжности. Если оцениваемое мероприятие по повышению надёжности охватывает слишком большую номенклатуру изделий с разнообразными технико-экономическими показателями, то расчёт производится на изделие-представитель (группу изделий-представителей) с последующей экстраполяцией полученных результатов на всю продукцию с улучшенными показателями надёжности.

Расчёт экономической эффективности повышения надёжности осуществляется в следующей последовательности:

– выбор базы сравнения; установление расчётного года;

– определение источников экономии;

– математическое моделирование (выбор расчётной формулы);

– сбор и анализ исходных данных;

– выполнение расчёта.

Экономическая эффективность повышения надёжности может рассчитываться как по отдельным её составляющим: безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости, так и по комплексным показателям (например, коэффициенту готовности).

При разнонаправленном изменении показателей надёжности (повышение одних и снижение других) экономическая эффектив-

ность определяется как алгебраическая сумма экономических эффектов от изменения различных показателей надёжности.

Для впервые разрабатываемых новых машин при определении экономической эффективности в качестве базы сравнения принимается достигнутый уровень технико-экономических показателей машин, близких по конструктивно-технологическим и эксплуатационным свойствам и предназначенных для замены вновь разрабатываемыми машинами.

При модернизации серийно выпускаемых машин в качестве базы сравнения принимаются технико-экономические показатели этих серийно выпускаемых машин.

В тех случаях, когда новая или модернизированная машина выпускается на ряде заводов-изготовителей, отличающихся уровнем развития производства, в расчёт принимаются среднеотраслевые значения технико-экономических показателей базовой и проектируемой машины с повышенной надёжностью.

В связи с тем, что эксплуатация машин осуществляется, как правило, на большом количестве предприятий, в расчёте могут использоваться или статистические технико-экономические показатели эксплуатации, или данные наиболее типичных, наиболее представительных предприятий, обеспечивающих максимально полезный результат использования машин. В случаях, когда повышение надёжности отечественной машины влияет на изменение её конкурентоспособности, в результате чего предполагается замена зарубежных аналогов отечественными машинами, то за базу сравнения принимают данные об эксплуатации и стоимости зарубежных аналогов.

В обоснованных случаях в качестве базы сравнения могут применяться лучшие мировые образцы, зарубежные аналоги. Такой расчёт может проводиться в том случае, если имеются достоверные данные о технико-экономических показателях производства и эксплуатации зарубежных аналогов и есть возможность привести в сопоставимый вид эти показатели с соответствующими технико-экономи-ческими показателями производства и эксплуатации оцениваемой машины с повышенной надёжностью.

Годовой экономический эффект определяется, исходя из объёма выпуска и величины технико-экономических показателей в расчётном году.

За расчётный год принимается год после окончания планируемого срока освоения выпуска машин с повышенной надёжностью.

Как правило, это второй или третий год серийного выпуска оцениваемой продукции.

Повышение надёжности оказывает решающее влияние на улучшение технико-экономических показателей эксплуатации машин. В зависимости от номенклатуры изменяемых показателей надёжности улучшаются те или иные технико-экономические показатели, определяющие эксплуатационные свойства машин.

Повышение безотказности характеризуется увеличением наработки на отказ или вероятности безотказной работы.

Повышение безотказности работы машины приводит к уменьшению количества внезапных отказов машин и тем самым снижает величину затрат на устранение отказов, которые входят в состав эксплуатационных издержек потребителя. В состав этих издержек входят, как правило, заработная плата ремонтных рабочих и стоимость используемых в ремонте запасных частей и материалов.

Эксплуатационные издержки определяются обычно или за год службы изделия в расчёте на единицу выпущенной продукции (выполненной работы) или в расчёте на единицу полезного эффекта. Второй вариант предпочтительнее, так как позволяет легче приводить в сопоставимый вид сравниваемые базовый и проектируемый уровни надёжности.

Кроме того, повышение безотказности приводит к увеличению времени эффективной работы машины за счёт уменьшения времени простоя машины в ремонте. Таким образом, увеличение наработки на отказ равносильно повышению роста производительности машины.

Улучшение ремонтопригодности характеризуется средним временем постановления отказа или удельной трудоемкостью восстановления.

Улучшение ремонтопригодности машины приводит к тому же экономическому эффекту, что и рост безотказности. При одинаковых показателях безотказности эффективнее будет работа машины с более высокими показателями ремонтопригодности. Уменьшение времени на поиск и устранение отказа приводит, так же как и при росте безотказности, к уменьшению эксплуатационных издержек и повышению времени эффективной работы (росту производительности).

Сохраняемость продукции машиностроения характеризуется средним или установленным сроком сохраняемости и во многом определяется условиями упаковки, транспортирования и хранения. Повышение показателей сохраняемости приводит к снижению (ино-

гда значительному) сопутствующих капитальных затрат потребителя на монтаж, на приведение машины в работоспособное состояние, позволяет сократить сроки освоения проектной мощности машины.

Основными *показателями долговечности* являются ресурс и срок службы.

Повышение долговечности во многих случаях равносильно дополнительному выпуску машин. Машина с увеличенным сроком службы ежегодно переносит на выпускаемую ею продукцию (выполненную работу) меньшую часть своей балансовой стоимости, уменьшая тем самым стоимость выпущенной продукции.

Основным показателем долговечности, используемым при расчётах экономической эффективности, является ежегодная доля отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию).

В простейшем случае доля отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление P может быть представлена в виде

$$P = \frac{1}{T_{сл}}, \tag{6.161}$$

где $T_{сл}$ – срок службы машины.

Более точные результаты могут быть получены по формуле

$$P = \frac{E}{(1+E)^{T_{сл}-1}}, \tag{6.162}$$

где $E = 0{,}1$.

После определения возможных источников экономии в результате повышения надёжности выбирается расчётная формула для определения годового экономического эффекта.

В самом общем виде годовой экономический эффект $Э$ определяется по формуле

$$Э = \left[(C_1 + E_H K_1)\frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(И_1' - И_2') - E_H(K_2' - K_1')}{P_2 + E_H} - (C_2 + E_H K_2) \right] A_2, \tag{6.163}$$

где C_1 и C_2 – себестоимость единицы продукции до и после повышения надёжности; K_1 и K_2 – удельные капитальные вложения в производственные фонды до и после повышения надёжности; $E_H = 0{,}15$ – нормативный коэффициент экономической эффективности; B_1 и B_2 – годовые объёмы продукции (работы), производимой одной машиной до и после повышения надёжности; $И_1'$ и $И_2'$ – среднегодовые эксплу-

атационные издержки потребителя до и после повышения надёжности в расчёте на объём продукции (работы), производимой машиной с повышенной надёжностью, в этих издержках учитывается только часть амортизации, предназначенная на капитальный ремонт, а также амортизационные отчисления по сопутствующим капитальным вложениям потребителя; K_1' и K_2' – сопутствующие капитальные вложения потребителя (без учёта стоимости оцениваемых машин) до и после повышения надёжности в расчёте на объём продукции (работы), производимой машиной с повышенной надёжностью; P_1 и P_2 – доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) до и после повышения надёжности; A_2 – годовой объём производства машин с повышенной надёжностью в расчётном году в натуральных единицах.

При изменении отдельных составляющих надёжности формула (6.163) будет видоизменяться и упрощаться.

При повышении безотказности годовой экономический эффект Э равен:

$$Э = \left[(C_1 + E_H K_1) \frac{B_2}{B_1} + \frac{(И_1' - И_2') - E_H (K_2' - K_1')}{P_2 + E_H} - (C_2 + E_H K_2) \right] A_2 . \quad (6.164)$$

Основные экономические преимущества повышения безотказности выразятся в увеличении коэффициента учёта производительности $\left(\frac{B_2}{B_1} \right)$, в связи с уменьшением количества отказов, снижении годовых эксплуатационных издержек $И_2$ в расчёте на машину более высокой производительности и экономии сопутствующих капитальных вложений $(K_2' - K_1')$ в связи с ростом производительности машины с повышенной надёжностью.

Экономический эффект от повышения ремонтопригодности так же будет определяться по формуле (6.164), а основные экономические последствия будут связаны с уменьшением длительности простоев в связи с уменьшением времени на поиск и устранение отказов.

Годовой экономический эффект от повышения сохраняемости выражается в сокращении затрат на монтаж, наладку, приведение машины в работоспособное состояние (6.165) и сокращение сроков освоения проектной мощности:

$$Э = \left[(C_1 + E_H K_1) + \frac{(И_1' - И_2') - E_H (K_2' - K_1')}{P_2 + E_H} - (C_2 + E_H K_2) \right] A_2 ; \quad (6.165)$$

$$Э = B_2 \frac{\Delta t}{12}(Ц - C)A_2, \qquad (6.166)$$

где Δt – сокращение длительности освоения проектной мощности (месяцы); $Ц$ и C – цена и себестоимость продукции (работы), выпускаемой машиной с повышенной надёжностью.

Годовой экономический эффект от повышения долговечности рассчитывается по формуле

$$Э = \left[(C_1 + E_H K_1')\frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(И_1' - И_2') - E_H(K_2' - K_1')}{P_2 + E_H} - (C_2 + E_H K_2)\right]A_2. \qquad (6.167)$$

В зависимости от номенклатуры изменяемых показателей надёжности могут использоваться и другие формулы, в которых должны отражаться те или иные технико-экономические показатели машин с повышенной надёжностью.

Кроме основного экономического эффекта, определяемого по формулам (6.163)–(6.167), при повышении показателей надёжности некоторых видов машин создается дополнительный экономический эффект в сопряженных сферах. Его определяют по величине предотвращенного в результате повышения надёжности ущерба, исходя из технологических особенностей эксплуатации машин.

В зависимости от эксплуатационного назначения машин с целью определения предотвращенного ущерба продукцию машиностроения можно разделить на следующие группы:

– продукция тракторного и сельскохозяйственного машиностроения (предотвращенный ущерб – уменьшение потерь сельскохозяйственной продукции, повышение урожайности);

– продукция энергетического машиностроения (уменьшение потерь у потребителя электроэнергии в результате снижения количества случаев отключения электроэнергии);

– производство транспортных средств (автомобилестроение, судостроение, производство средств железнодорожного транспорта) – предотвращенный ущерб выразится в уменьшении страховых заделов, создаваемых предприятиями и организациями на случай срыва поставок смежников в связи с отказами средств транспорта;

– производство различного технологического оборудования, повышение надёжности которого приводит к сокращению межоперационных переделов, создаваемых на поточных линиях с целью обеспе-

чения их бесперебойной работы при внезапном отказе одного из станков этой поточной линии.

Сбор исходных данных является наиболее длительной и трудоемкой частью проведения расчёта экономической эффективности.

Определение исходных данных для проведения расчёта осуществляется двумя основными методами: статистической обработкой информации и методами прогнозирования.

Себестоимость машины, принятой за базу сравнения, определяется исходя из её среднеотраслевой себестоимости с учётом динамики к расчётному году. В тех случаях, когда большая часть оцениваемых машин выпускается на одном предприятии, себестоимость производства этой машины может применяться в качестве базы сравнения (также приведенной к расчётному году).

Себестоимость машины с повышенной надёжностью прогнозируется на основе существующих экономико-математических методов.

Дополнительные текущие затраты на повышение надёжности $c(f(н))$ могут определяться прямым счётом, если известны конкретные мероприятия по повышению надёжности. В этом случае необходимо определить затраты на эти мероприятия:

$$c_1(f(н)) = c_р + c_а + c_с + c_в + c_м + c_{пр}, \qquad (6.168)$$

где $c_р$ – затраты на резервирование; $c_з$ – затраты на замену узлов и деталей часто выходящих из строя на более совершенные по конструктивному исполнению, по используемым материалам, по применяемой технологии изготовления и т. д.; $c_с$ – затраты на совершенствование методов контроля; $c_в$ – затраты на введение дополнительных контрольных операций; $c_м$ – затраты на совершенствование методов испытаний; $c_{пр}$ – прочие затраты.

Удельные капитальные вложения в производственные фонды машины, принятой за базу сравнения, определяются исходя из среднеотраслевого значения фондоемкости производства:

$$K_1 = c_1 Ф, \qquad (6.169)$$

где K_1 – удельные капитальные вложения базовой машины; c_1 – себестоимость базовой машины в расчётном году; $Ф$ – среднеотраслевая фондоёмкость продукции, приведенная к расчётному году с учётом динамики этого показателя.

Удельные капитальные вложения в производственные фонды для производства машины с повышенной надёжностью, как правило,

определяются исходя из величины дополнительных единовременных затрат на осуществление мероприятий по повышению надёжности.

Дополнительные единовременные затраты проводятся по фактору времени к расчётному году по формуле

$$\Delta K = \sum_{1}^{t} K_i (1 + E)^{t-1}, \qquad (6.170)$$

где ΔK – дополнительные единовременные затраты; K_i – единовременные затраты в i-м году; $E = 0{,}1$ – норматив приведения; t – число лет от начала осуществления мероприятий до расчётного года.

В состав дополнительных единовременных затрат включаются:

– стоимость основных производственных фондов, дополнительно приобретенных для обеспечения повышения надёжности;

– дополнительная стоимость нормируемых оборотных средств;

– сметная стоимость НИОКР по повышению надёжности машин;

– техническая подготовка производства машин с повышенной надёжностью.

Удельные капитальные вложения для машин с повышенной надёжностью определяются по формуле

$$K_2 = K_1 + \frac{\Delta K}{A_2}, \qquad (6.171)$$

где A_2 – выпуск машин в расчётном году в натуральном выражении.

Определение годовых объёмов продукции (работы), выпущенной одной машиной B, позволяет определить коэффициент роста производительности $\frac{B_2}{B_1}$.

Для продукции производственно-технического назначения величина годового объёма продукции, выпущенной одной машиной, прямо пропорциональна эффективному времени её работы. Повышение безотказности и ремонтопригодности машины позволяет увеличить время эффективной работы машины за счёт уменьшения количества отказов или сокращения времени на поиск и устранение отказов. В этом случае можно считать:

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{T_\partial - K_{OTK\ 2} t_{Y2}}{T_\partial - K_{OTK\ 1} t_{Y1}}, \qquad (6.172)$$

где T_∂ – плановый годовой фонд времени работы машины с учётом коэффициента сменности и времени простоя в плановых ремонтах и

техническом обслуживании; K_{OTK2} и K_{OTK1} – число внезапных отказов за год у машин с базовой и повышенной безотказностью; $t_{У1}$ и $t_{У2}$ – время устранения одного отказа у машин с базовой и повышенной ремонтопригодностью.

Плановый годовой фонд времени работы машины устанавливается исходя из средних условий эксплуатации. Это усреднение может осуществляться исходя из выбора наиболее типичных условий эксплуатации одного изделия (сменность, загрузка и т. д.) или на основании статистических данных о загрузке машин. И в том и в другом случае принятые показатели подтверждаются эксплуатирующими организациями.

Данные о количестве отказов и длительности их устранения принимаются как на основании величии, указанных в НТД, так и по данным испытаний (уточненный расчёт).

Повышение долговечности характеризуется коэффициентом учёта изменения срока службы $\frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H}$.

Доля отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) определяется в зависимости от срока службы:

$$P_t = \frac{1}{T_{сп}} \quad \text{или} \quad P = \frac{E}{(1+E)^{T_{сп}} - 1}, \tag{6.173}$$

где $T_{сп}$ – срок службы до списания с учётом морального износа.

Изменение годовых эксплуатационных издержек в расчёте на объём продукции (работы), производимой с помощью машины повышенной надёжности, определяется уменьшением затрат на устранение отказов за счёт сокращения их количества и снижения трудоемкости, а также расхода части эксплуатационных материалов в связи с ростом производительности машины с повышенной надёжностью.

Уменьшение затрат на устранение отказов складывается из снижения трудоемкости, экономии запасных частей и материалов, уменьшения амортизационных отчислений основных производственных фондов эксплуатирующих предприятий.

Изменение сопутствующих капитальных вложений в сфере эксплуатации определяется без учёта изменения стоимости (цены) машины повышенной надёжности в расчёте на объём продукции (работы), производимой такой машиной. В тех случаях, когда сопутству-

ющие капитальные вложения не меняются, учитывается только изменение производительности машины с повышенной надёжностью:

$$K_2' = K_1' \frac{B_1}{B_2}. \quad (6.174)$$

В тех случаях, когда известны мероприятия по повышению надёжности, определение величины единовременных и текущих затрат можно осуществлять прямым счётом или исходя из нормативов, разработанных на проведение этих мероприятий.

Проведение конструкторских и материаловедческих мероприятий в основном оказывает влияние на себестоимость изготовления машин повышенной надёжности.

При замене одной сборочной единицы, детали или крепежа другими себестоимость вычисляется по формуле

$$C_2 = C_1 - C_З + C_В, \quad (6.175)$$

где $C_З$ – стоимость (цена или технологическая себестоимость) исключаемой детали; $C_В$ – стоимость детали, устанавливаемой взамен.

При использовании другого материала:

$$C_2 = C_1 - N_З Ц_З + N_В Ц_В, \quad (6.176)$$

где $N_З$ и $N_В$ – норма расхода исключаемого и вновь вводимого материала; $Ц_З$ и $Ц_В$ – цена исключаемого и вновь вводимого материала.

При введении дополнительных узлов и деталей (резервирование, блокировка, автоконтролирующие и саморегулирующие устройства и т. д.) себестоимость рассчитывается по формуле

$$C_2 = C_1 + \sum_1^n C_{Bi}, \quad (6.177)$$

где $C_В$ – стоимость (оптовая цена или технологическая себестоимость) дополнительно вводимых узлов и деталей; n – количество дополнительно вводимых узлов и деталей.

При использовании материалов, дополнительно прошедших упрочняющую обработку, – (6.178) и (6.179):

$$C_2 = C_1 + \sum_1^n C_{oni}, \quad (6.178)$$

где C_{oni} – дополнительные затраты на i-ю операцию по упрочняющей обработке материалов; n – количество дополнительных операций;

$$C_{oni} = t_i n_i + M_i + P_i K_i, \quad (6.179)$$

где t_i – штучно-калькуляционное время на проведение i-й операции; n_i – расценка i-й операции; M_i – норма расхода основных материалов на i-ю операцию; K_i – балансовая стоимость оборудования, используемого на i-й операции; P_i – норма амортизационных отчислений на i-ю операцию.

При проведении мероприятий на стадии производства изменения затрагивают как себестоимость изготовления, так и величину удельных капитальных вложений.

При изменении или введении новых технологических и контрольных операций величина себестоимости определяется по формулам (6.175)–(6.179).

При использовании нового технологического и контрольного оборудования изменяется величина удельных капитальных вложений:

$$K_2 = K_1 + \frac{\Delta K}{A_2}, \qquad (6.180)$$

где ΔK – балансовая стоимость дополнительного оборудования, используемого с целью повышения надёжности выпускаемых машин; A_2 – годовой выпуск машин повышенной надёжности в расчётном году.

Обеспечение достоверности контрольной информации связано в основном с совершенствованием методов статистического контроля. В этом случае повышение надёжности связано с изменением затрат на осуществление контрольных операций.

Мероприятия, осуществляемые на стадии эксплуатации, связаны с изменением текущих затрат как в изготовлении, так и в эксплуатации.

Оптимизация системы технического обслуживания, ремонта и диагностирования связана с изменением текущих издержек.

Сокращение периодичности и увеличение объёмов плановых текущих ремонтов, технических обслуживаний, введение дополнительных операций по диагностированию технического состояния машин увеличивают годовые эксплуатационные издержки потребителей.

При уменьшении периодичности и увеличении объёмов технического обслуживания и текущих ремонтов:

$$И_2 = И_1' + \sum_1^n \left(\frac{Г_ф}{T_{oi}''} C_{oi}'' - \frac{Г_ф}{T_{oi}'} C_{oi}' \right) - \left(\frac{Г_ф}{T_{TP}''} C_{TP}'' - \frac{Г_ф}{T_{TP}'} \right) C_{TP}', \qquad (6.181)$$

где $Г_Ф$ – годовой фонд времени работы машины; T_{oi}' и T_{oi}'' – периодичность технического обслуживания i-го вида до и после проведения работ по повышению надёжности; C_{oi}' и C_{oi}'' – стоимость технического обслуживания i-го вида до и после проведения работ по повышению надёжности; T_{TP}' и T_{TP}'' – периодичность проведения текущих ремонтов до и после проведения работ по повышению надёжности; C_{TP}' и C_{TP}'' – стоимость текущего ремонта до и после проведения работ по повышению надёжности.

При проведении дополнительных операций по диагностированию технического состояния машин или введения дополнительных технических обслуживании и текущих ремонтов:

$$И_2' = И_1' + \sum_1^l C_Д , \qquad (6.182)$$

где $C_Д$ – стоимость дополнительных операций диагностирования, технического обслуживания и ремонта; l – количество дополнительных видов диагностирования, технического обслуживания и ремонта.

Оптимизация номенклатуры и количества запасных частей, как правило, приводит к изменению запасов товарно-материальных ценностей (оборотных средств) эксплуатирующих предприятий и требует изменения производственных мощностей предприятий-изготовителей.

Сопутствующие капитальные вложения в результате оптимизации номенклатуры и количества запасных частей:

$$K_2' = K_1' \pm \sum_1^k C_{З.Ч_i} \left(\gamma_{1i} - \gamma_{2i}\right), \qquad (6.183)$$

где $C_{З.Ч_i}$ – цена запасных частей i-го вида; γ_{1i} и γ_{2i} – норма расхода запасных частей i-го вида до и после оптимизации; k – количество видов запасных частей.

Удельные капитальные вложения предприятий-изготовителей в результате оптимизации номенклатуры и количества запасных частей:

$$K_2 = K_1 - \frac{K_{З.Ч1} - K_{З.Ч2}}{A_2}, \qquad (6.184)$$

где $K_{З.Ч1}$ и $K_{З.Ч2}$ – стоимость основных производственных фондов и нормируемых оборотных средств, используемых в производстве запасных частей до и после оптимизации их номенклатуры и количества; A_2 – годовой выпуск машин повышенной надёжности.

6.8. Правовой, социальный и организационный аспекты надёжности

Действующим в России законодательством определены требования по порядку установления показателей надёжности срока службы (годности) изделий, а также правовые вопросы по порядку устранения различных недостатков технических изделий (ТИ) в процессе эксплуатации, в том числе и по порядку восстановления работоспособности в случае отказа ТИ. Основными характеристиками, которые регулируют во времени взаимоотношения между изготовителем (поставщиком) и потребителем ТИ, являются: гарантийные обязательства изготовителя (поставщика), включающие гарантийный срок или гарантийную наработку; срок службы (годности) или ресурс ТИ.

Понятие срока службы впервые в законодательстве было использовано в Законе «О защите прав потребителей» в статье о праве потребителя на безопасность товаров (работ, услуг). До принятия этого Закона указанное понятие применялось в технической литературе и технической документации, в том числе и в государственных стандартах, как техническая характеристика надёжности и долговечности продукции (обычно машин, приборов и другой продукции производственного назначения), не неся никакой юридической нагрузки.

В соответствии с п. 1 ст. 5 Закона «О защите прав потребителей» на товар (работу), предназначенный для длительного использования, изготовитель (исполнитель) вправе устанавливать ***срок службы*** – период, в течение которого изготовитель (исполнитель) обязуется обеспечивать потребителю возможность использования товара (работы) по назначению и нести ответственность за существенные недостатки, возникшие по его вине.

Существенный недостаток товара (работы, услуги) – неустранимый недостаток или недостаток, который не может быть устранен без несоразмерных расходов или затрат времени, или выявляется неоднократно, или проявляется вновь после его устранения, или другие подобные недостатки.

Изготовитель (исполнитель) обязан устанавливать срок службы товара (работы) длительного пользования, в том числе комплектующих изделий (деталей, узлов, агрегатов), которые по истечении определённого периода могут представлять опасность для жизни, здоровья потребителя, причинять вред его имуществу или окружаю-

щей среде. Перечень таких товаров (работ) утверждается Правительством Российской Федерации.

На товары (работы), предназначенные для длительного использования, не включенные в указанный перечень, изготовитель (исполнитель) вправе устанавливать долговечность (срок службы, ресурс). Долговечность может исчисляться единицами времени, а также иными единицами измерения (километрами, метрами и прочими единицами измерения, исходя из функционального назначения товара (результата работы)).

Продолжительность (срок службы) определяется, прежде всего, периодом безопасного использования товара, основанным на объективных данных его эксплуатации, испытаний, специальных исследований и т. п. Искусственное, необоснованное занижение срока службы в этом случае чревато повышенной возможностью нарушения обязательств по обеспечению безопасности товара, причинения вреда жизни и здоровью потребителя, окружающей среде и, как следствие этого, экономическими потерями.

На медикаменты (например, входящие в комплект бортовых медицинских аптечек), товары бытовой химии и иные подобные товары (работы) изготовитель (исполнитель) обязан устанавливать ***срок годности*** – период, по истечении которого товар (работа) считается непригодным для использования по назначению.

Перечень товаров (работ), на которые изготовитель (исполнитель) обязан устанавливать срок годности, утверждается Правительством Российской Федерации.

Перечни товаров, на которые изготовитель обязан устанавливать срок годности или срок службы, утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 16 июня 1997 г. № 720 «Об утверждении перечня товаров длительного пользования, в том числе комплектующих изделий (деталей, узлов, агрегатов), которые по истечении определённого периода могут представлять опасность для жизни, здоровья потребителя, причинять вред его имуществу или окружающей среде и на которые изготовитель обязан устанавливать срок службы и перечня товаров, которые по истечении срока годности считаются непригодными для использования по назначению».

В соответствии с п. 5 ст. 5 Закона «О защите прав потребителей» продажа товара (выполнение работы) по истечении установленного срока годности, а также товара (выполнение работы), на который

должен быть установлен срок годности или срок службы, но он не установлен, запрещается.

Срок годности товара определяется периодом, исчисляемым со дня изготовления товара, в течение которого он пригоден к использованию, или датой, до наступления которой товар пригоден к использованию. Единственным критерием определения продолжительности срока годности являются физико-химические свойства товара (работы).

Изготовитель (исполнитель) вправе устанавливать на товар (работу) ***гарантийный срок*** – период, в течение которого в случае обнаружения в товаре (работе) недостатка изготовитель (исполнитель), продавец, уполномоченная организация или уполномоченный индивидуальный предприниматель, импортер обязаны удовлетворить требования потребителя.

Недостаток товара (работы, услуги) – несоответствие товара (работы, услуги) или обязательным требованиям, предусмотренным законом либо в установленном им порядке, или условиям договора (при их отсутствии или неполноте условий обычно предъявляемым требованиям), или целям, для которых товар (работа, услуга) такого рода обычно используется, или целям, о которых продавец (исполнитель) был поставлен в известность потребителем при заключении договора, или образцу и/или описанию при продаже товара по образцу и/или по описанию.

В соответствии со ст. 6 изготовитель обязан обеспечить возможность использования товара в течение его срока службы. Для этой цели изготовитель обеспечивает ремонт и техническое обслуживание товара, а также выпуск и поставку в торговые и ремонтные организации в необходимых для ремонта и технического обслуживания объёме и ассортименте запасных частей в течение срока производства товара и после снятия его с производства в течение срока службы товара, а при отсутствии такого срока в течение десяти лет со дня передачи товара потребителю.

Изготовитель (исполнитель) обязан в соответствии со ст. 7, п. 2 обеспечивать безопасность товара (работы) в течение установленного срока службы или срока годности товара (работы).

Если изготовитель (исполнитель) не установил на товар (работу) срок службы, он обязан обеспечить безопасность товара (работы) в течение десяти лет со дня передачи товара (работы) потребителю.

В соответствии со ст. 10 изготовитель (исполнитель, продавец) обязан своевременно предоставлять потребителю необходимую и достоверную информацию о товарах (работах, услугах), обеспечивающую возможность их правильного выбора.

В соответствии с п. 2 ст. 472 Гражданского кодекса Российской Федерации товар, на который установлен срок годности, продавец обязан передать покупателю с таким расчётом, чтобы он мог быть использован по назначению до истечения срока годности. Если товар вошел в перечень товаров, на которые должны быть установлены сроки годности, то независимо от того, где такой товар произведен, продавец не просто должен довести имеющуюся информацию о сроке годности до потребителя, но и передать товар до окончания срока годности.

Имущественная ответственность за вред, причиненный вследствие недостатков товара (работы, услуги), изложена в ст. 14.

1. Вред, причиненный жизни, здоровью или имуществу потребителя вследствие конструктивных, производственных, рецептурных или иных недостатков товара (работы, услуги), подлежит возмещению в полном объёме.

2. Право требовать возмещения вреда, причиненного вследствие недостатков товара (работы, услуги), признается за любым потерпевшим независимо от того, состоял он в договорных отношениях с продавцом (исполнителем) или нет.

3. Вред, причиненный жизни, здоровью или имуществу потребителя, подлежит возмещению, если вред причинен в течение установленного срока службы или срока годности товара (работы).

Если на товар (результат работы) должен быть установлен в соответствии с п. 2, 4 ст. 5 срок службы или срок годности, но он не установлен, либо потребителю не была предоставлена полная и достоверная информация о сроке службы или сроке годности, либо потребитель не был проинформирован о необходимых действиях по истечении срока службы или срока годности и возможных последствиях при невыполнении указанных действий, либо товар (результат работы) по истечении этих сроков представляет опасность для жизни и здоровья, вред подлежит возмещению независимо от времени его причинения.

Если в соответствии с п. 1 ст. 5 изготовитель (исполнитель) не установил на товар (работу) срок службы, вред подлежит возмещению в случае его причинения в течение десяти лет со дня передачи

товара (работы) потребителю, а если день передачи установить невозможно, с даты изготовления товара (окончания выполнения работы).

Вред, причиненный вследствие недостатков товара, подлежит возмещению продавцом или изготовителем товара по выбору потерпевшего. Вред, причиненный вследствие недостатков работы или услуги, подлежит возмещению исполнителем.

Если на товар гарантийный срок не установлен ни продавцом, ни изготовителем, то, учитывая положения п. 1, 2 ст. 477 Гражданского кодекса Российской Федерации, требования, связанные с недостатками товара, могут быть предъявлены покупателем к продавцу или организации, выполняющей функции продавца, при условии, что недостатки были обнаружены в разумный срок, но в пределах 6 месяцев со дня передачи товара покупателю (в отношении недвижимого имущества – не позднее двух лет со дня передачи его потребителю). При определении разумности сроков рекомендуется исходить из гарантийных сроков, установленных государственными стандартами, а если они не установлены – из показателей долговечности товара, установленных нормативными документами по стандартизации.

В случаях, когда иностранный изготовитель находится за пределами юрисдикции Российской Федерации и товар такого изготовителя, включенный в перечень, не сопровожден информацией о сроке службы, продавец вправе реализовывать такой товар потребителям без информации о них. Однако продавец должен иметь в виду, что в соответствии с Гражданским кодексом Российской Федерации (п. 2 ст. 1097) и Законом «О защите прав потребителей» (п. 3 ст. 14) ответственность за вред, причиненный недостатками такого товара, наступает независимо от времени его причинения.

В соответствии с п. 1 ст. 18 потребитель в случае обнаружения в товаре недостатков, если они не были оговорены продавцом, по своему выбору вправе:

– потребовать замены на товар этой же марки (этих же модели и/или артикула);

– потребовать замены на такой же товар другой марки (модели, артикула) с соответствующим перерасчётом покупной цены;

– потребовать соразмерного уменьшения цены;

– потребовать незамедлительного безвозмездного устранения недостатков товара или возмещения расходов на их исправление потребителем или третьим лицом;

– отказаться от исполнения договора купли-продажи и потребовать возврата уплаченной за товар суммы. По требованию продавца и за его счёт потребитель должен возвратить товар с недостатками.

При этом потребитель вправе потребовать также полного возмещения убытков, причиненных ему вследствие продажи товара ненадлежащего качества.

Сроки предъявления потребителем требований в отношении недостатков товара изложены в ст. 19.

1. Потребитель вправе предъявить предусмотренные ст. 18 требования к продавцу (изготовителю, уполномоченной организации или уполномоченному индивидуальному предпринимателю, импортеру) в отношении недостатков товара, если они обнаружены в течение гарантийного срока или срока годности.

В отношении товаров, на которые гарантийные сроки или сроки годности не установлены, потребитель вправе предъявить указанные требования, если недостатки товаров обнаружены в разумный срок, но в пределах двух лет со дня передачи их потребителю, если более длительные сроки не установлены законом или договором.

2. Гарантийный срок товара, а также срок его службы исчисляется со дня передачи товара потребителю, если иное не предусмотрено договором. Если день передачи установить невозможно, эти сроки исчисляются со дня изготовления товара.

Срок годности товара определяется периодом, исчисляемым со дня изготовления товара, в течение которого он пригоден к использованию, или датой, до наступления которой товар пригоден к использованию.

Продолжительность срока годности товара должна соответствовать обязательным требованиям к безопасности товара.

3. Гарантийные сроки могут устанавливаться на комплектующие изделия и составные части основного товара. Гарантийные сроки на комплектующие изделия и составные части исчисляются в том же порядке, что и гарантийный срок на основной товар.

4. В случаях, когда предусмотренный договором гарантийный срок составляет менее двух лет и недостатки товара обнаружены потребителем по истечении гарантийного срока, но в пределах двух лет, потребитель вправе предъявить продавцу (изготовителю) требования, предусмотренные ст. 18, если докажет, что недостатки товара возникли до его передачи потребителю или по причинам, возникшим до этого момента.

5. В случае выявления существенных недостатков товара потребитель вправе предъявить изготовителю (уполномоченной организации или уполномоченному индивидуальному предпринимателю, импортеру) требование о безвозмездном устранении таких недостатков, если докажет, что они возникли до передачи товара потребителю или по причинам, возникшим до этого момента. Указанное требование может быть предъявлено, если недостатки товара обнаружены по истечении двух лет со дня передачи товара потребителю, в течение установленного на товар срока службы или в течение десяти лет со дня передачи товара потребителю в случае неустановления срока службы.

Ответственность продавца (изготовителя, уполномоченной организации или уполномоченного индивидуального предпринимателя, импортера) за просрочку выполнения требований потребителя определена в ст. 23: за нарушение предусмотренных ст. 20, 21 и 22 сроков, а также за невыполнение (задержку выполнения) требования потребителя о предоставлении ему на период ремонта (замены) аналогичного товара продавец (изготовитель, уполномоченная организация или уполномоченный индивидуальный предприниматель, импортер), допустивший такие нарушения, уплачивает потребителю за каждый день просрочки неустойку (пеню) в размере одного процента цены товара.

Для предприятия-изготовителя условия гарантийных обязательств (гарантийного срока или гарантийного ресурса) определяет размер экономических издержек, связанных с гарантийным обслуживанием.

Гарантийные обязательства являются важной характеристикой любого изделия. Гарантийные обязательства – это реальные обязательства безвозмездно устранить недостатки изделий в течение установленного срока.

Исходя из требований, установленных в законодательстве, величина срока службы взаимосвязана со свойствами изделий: безопасностью эксплуатации, безотказностью объекта и его ремонтопригодностью.

Под безопасностью объекта понимают возможность возникновения в процессе эксплуатации опасных ситуаций, при возникновении которых возможно причинение вреда жизни и здоровью потребителя, имуществу потребителя, окружающей среде. Для любого объек-

та возникновение опасных ситуаций может быть вызвано возникновением отказов, которые создают опасную ситуацию.

Свойства безопасности и безотказности объекта взаимосвязаны. При определении срока службы показатели безотказности влияют как на характеристики безопасности, так и на количество отказов, которые могут быть отнесены к существенным недостаткам. Исходя из определения существенного недостатка, можно сделать вывод, что в течение срока службы изготовитель обязан безвозмездно устранить отказы по системам объекта, которые не включаются в состав запасных частей, или провести их капитальный ремонт, или поставить взамен отказавшего объекта другой, работоспособный. В соответствии с действующим законодательством изготовитель или поставщик изделия как в течение установленного им срока службы, так и по гарантийным обязательствам, может нести определённые экономические издержки. В состав этих издержек можно включить:

– затраты на возмещение возможного вреда, причиненного жизни или здоровью потребителя;

– затраты на возмещение возможного вреда, причиненного имуществу потребителя;

– затраты на возмещение возможного вреда, причиненного окружающей среде;

– затраты на устранение возможных существенных недостатков;

– затраты на выплату неустойки за несвоевременное устранение существенных недостатков;

– затраты на изготовление и хранение запасных частей, необходимых для проведения ремонта в течение срока службы, после прекращения производства изделий.

Все эти виды затрат зависят от возможного количества отказов объекта в течение срока службы, то есть от характеристик безотказности как основного свойства надёжности изделий.

Величина издержек изготовителя на гарантийное обслуживание влияет на себестоимость объекта и его цену.

Национальные стандарты по надёжности с 1990 г. разрабатывает ТК 119 «Надёжность в технике», который ведёт систему стандартов с одноимённым наименованием (ГОСТ Р 27.ХХХ) и по Положению взаимодействует с МЭК/ТК 56 «Надёжность».

В последнее время стандарты по надёжности разрабатывает ОАО «НИЦ КД» в рамках созданного в 2001 г. ТК 10 «Перспективные производственные технологии, менеджмент и оценка рисков».

Основные национальные и международные стандарты в области надёжности приведены в Приложении А.

Ситуация в сфере технического надзора сегодня содержит множество нерешенных организационно-правовых проблем, существенно усложняющих процесс управления надёжностью. Систему управления, созданную здесь, вряд ли можно назвать оптимальной. В основных отраслях промышленности, транспорта и энергетики – сложилась неприемлемая ситуация: большинство ведомств, реализующих технологические функции, одновременно осуществляют и надзор за собой. Например, Федеральная служба по надзору в сфере транспорта осуществляет функции технического надзора по объектам всех видов транспорта, кроме трубопроводного, и является структурным подразделением Министерства транспорта России. Естественно, при расследовании крупных транспортных аварий прежде всего будут учитываться и защищаться ведомственные интересы. В расследованиях многочисленных аварий и катастроф, случившихся, возможно, в результате деятельности ведомства, оно безаппеляционно принимает на себя как функции расследования причин аварии, так и функции разработки мероприятий по предотвращению возникновения таких аварий.

Между тем ситуация перешла в критическую фазу, она требует принятия жестких и оперативных управленческих решений. Даже в соответствии со щадящими оценками официальной статистики сегодня уже свыше 80% объектов промышленности, энергетики и транспорта, в том числе объекты повышенной опасности, исчерпали свой технический ресурс. При этом в настоящее время ни одна из отраслей экономики не имеет системы стандартов, нормирующих вопросы формирования и контроля показателей надёжности и оптимального управления ими. Отсутствие полноценных стандартов сдерживает внедрение эффективных методов управления техническим состоянием объектов. Эпизодически принимаются отдельные руководящие документы, не объединенные принципами системности и направленные в основном на решение текущих проблем. Тем временем происходит ежегодный рост количества аварийных ситуаций, связанных с тяжелыми отказами технических систем. Эта угрожающая тенденция в числе многих других показывает остроту проблемы надёжности в техносфере, возрастающую по мере увеличения количества независимых владельцев объектов повышенной опасности.

В сфере эксплуатации вынужденно принимаются технически необоснованные решения, связанные с увеличением межремонтных циклов на фоне снижения технической готовности парка машин, внедрением не получивших достаточной апробации технологий капитального ремонта с продлением срока службы (КРП) и модернизацией (КРПМ), и многие другие – с очевидными негативными последствиями. Такие действия стали бы невозможными при наличии государственной нормативной базы по оценке текущего технического состояния объектов с применением утвержденной стандартной номенклатуры средств диагностики, планированию процессов ТО и ремонта по техническому состоянию, оценке остаточного ресурса и других нормируемых показателей надёжности.

Одним из важнейших факторов повышения эффективности процессов социотехнического регулирования надёжности является оптимальное построение организационных структур. Содержание всех процессов управления надёжностью должно формироваться при условии соблюдения пяти основных принципов формирования целенаправленных систем.

1. Целеобусловленность: цель первична, и для её реализации формируется система. Если система не обеспечивает или не содействует реализации заданной цели – она создана неудачно. Формирование техносферы никогда не являлось самоцелью, это средство для достижения целей социума, главной из которых является *качество жизни.* В контексте рассматриваемой здесь проблемы заданной целью является важнейший показатель качества жизни – *безопасность жизнедеятельности социума*.

2. Связанность: система должна быть управляемой по отношению к «старшей» и управляющей по отношению к «младшей». Здесь старшим уровнем являются процессы обеспечения безопасности жизнедеятельности, а младшим – экономико-правовые и технические процессы управления надёжностью эргатических систем.

3. Управляемость: система должна иметь необходимую для осуществления заданных функций и достаточную (оптимальную) структуру управления. В системе должна быть заложена возможность изменения функционирования в связи с изменением управляющих воздействий, например, ужесточением требований безопасности. В то же время система должна содержать внутреннюю защиту от «информационного шума», например от конъюнктурных или некомпетентных управляющих воздействий. Для задач социотехнического регу-

лирования, как и для других задач управления, обязательным условием является использование принципа разделения функций.

4. Симбиоз: система должна рассматривать человека как звено в цепи управления и его цель. Современная теория надёжности рассматривает и нормирует основные показатели применительно к эргатическим системам. Для многих областей техносферы такой подход является предпочтительным, а в ряде случаев – единственно возможным. Позиционирование человека как цели системы главным образом формирует экономико-правовые отношения в социотехнических системах и, как следствие, методы и средства управления надёжностью.

5. Координация: управление должно быть скоординировано с другими системами (см. п. 2) и осуществляться своевременно. В этой части проблемы необходимо особо выделить необходимость формирования более эффективной *комплексной системы управляющих воздействий* по отношению к субъектам всех форм собственности, осуществляющих функции проектирования, производства, эксплуатации и утилизации объектов повышенной опасности.

Необходимо констатировать, что фрагментарное решение проблем надёжности, как показывает опыт, приведет лишь к некоторой отсрочке получения общего отрицательного результата. Только комплексное и одновременное решение всех вопросов, составляющих проблему управления надёжностью, приведёт к получению ожидаемого позитивного результата.

Приложение А

(*обязательное*)

Система стандартов для оценки и управления показателями надёжности

Основные стандарты

1. ГОСТ 27.001-95. Система стандартов «Надёжность в технике». Основные положения.
2. ГОСТ Р 27.001-2009. Надёжность в технике. Система управления надёжностью. Термины и определения.
3. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
4. ГОСТ 27.003-2016. Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности.
5. ГОСТ 27.004-2009. Надёжность в технике. Модели отказов.
6. ГОСТ 27.004-85. Надёжность в технике. Системы технологические. Термины и определения.
7. ГОСТ 27.201-2011. Надёжность в технике. Экспертиза проектов.
8. ГОСТ 27.202-83. Надёжность в технике. Технологические системы. Методы оценки надёжности по параметрам качества изготовляемой продукции.
9. ГОСТ 27.203-83. Надёжность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надёжности.
10. ГОСТ 27.204-83. Надёжность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надёжности по параметрам производительности.
11. ГОСТ 27.301-95. Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения.
12. ГОСТ 27.310-95. Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
13. ГОСТ 27.402-95. Надёжность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Часть 1. Экспоненциальное распределение.
14. ГОСТ 27.410-87. Надёжность в технике. Методы контроля показателей надёжности и планы контрольных испытаний на надёжность.
15. ГОСТ 27.601-2011. Надёжность в технике. Управление надёжностью. Техническое обслуживание и его обеспечение.

16. ГОСТ 27.607-2013. Надёжность в технике. Управление надёжностью. Условия проведения испытаний на безотказность и статистические критерии и методы оценки их результатов.

17. ГОСТ Р 51901.16-2005. Менеджмент риска. Повышение надёжности. Статистические критерии и методы оценки.

18. ГОСТ Р 51901.6-2005. Менеджмент риска. Программа повышения надёжности.

19. ГОСТ Р 51901.5-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надёжности.

20. ГОСТ Р 51901.14-2005. Менеджмент риска. Метод структурной схемы надёжности.

21. ГОСТ Р 51901.2-2005. Менеджмент риска. Системы менеджмента надёжности.

22. ГОСТ Р 52527-2006. Установки газотурбинные. Надёжность, готовность, эксплуатационная технологичность и безопасность.

23. ГОСТ Р 53480-2009. Надёжность в технике. Термины и определения.

24. ГОСТ Р ИСО 14004-98. Системы управления окружающей средой. Общие руководящие указания по принципам, системам и средствам обеспечения функционирования.

25. ГОСТ Р ИСО 14031-2001. Управление окружающей средой. Оценивание экологической эффективности. Общие требования.

Вспомогательные стандарты

1. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.

2. ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей.

3. ГОСТ Р ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества – Требования.

4. ГОСТ Р ИСО 9004-2001. Системы менеджмента качества. Рекомендации по улучшению деятельности.

5. ГОСТ Р 50779.0-95. Статистические методы. Основные положения.

6. ГОСТ Р 50779.10-2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения.

7. ГОСТ Р 50779.11-2000. Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения.

8. ГОСТ Р ИСО/ТО 10017-2005. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001.

9. ГОСТ Р ИСО 16269-6-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение статистических толерантных интервалов.

10. ГОСТ Р ИСО 16269-8-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение предикционных интервалов.

11. ГОСТ Р 50779.22-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего.

12. ГОСТ Р 50779.24-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Оценка медианы.

13. ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004. Статистические методы. Статистическое представление данных. Медиана. Определение точечной оценки и доверительных интервалов.

14. ГОСТ Р 50779.25-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Мощность тестов для средних и дисперсий.

15. ГОСТ Р 50779.21-2004. Статистические методы. Правила определения и методы расчёта статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение.

16. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.

17. ГОСТ Р ИСО 11453-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Проверка гипотез и доверительные интервалы для пропорций.

18. ГОСТ Р 50779.23-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Сравнение двух средних в парных наблюдениях.

19. ГОСТ Р 50779.77-99. Статистические методы. Планы и процедуры статистического приемочного контроля нештучной продукции.

20. ГОСТ Р ИСО 11843-4-2005. Статистические методы. Способность обнаружения. Метод сравнения минимального обнаруживаемого значения с заданным значением.

21. ГОСТ Р 50779.76-99. Статистические методы. Последовательные планы выборочного контроля по количественному признаку

для процента несоответствующих единиц продукции (стандартное отклонение известно).

22. ГОСТ Р 50779.75-99. Статистические методы. Последовательные планы выборочного контроля по альтернативному признаку.

23. ГОСТ Р 50779.70-99. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 0. Введение в систему выборочного контроля по альтернативному признаку на основе приемлемого уровня качества AQL.

24. ГОСТ Р 50779.71-99. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 1. Планы выборочного контроля последовательных партий на основе приемлемого уровня качества AQL.

25. ГОСТ Р 50779.73-99. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 3. Планы выборочного контроля с пропуском партий.

26. ГОСТ Р ИСО 2859-4-2006. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 4. Оценка соответствия заявленному уровню качества.

27. ГОСТ Р 50779.72-99. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 2. Планы выборочного контроля отдельных партий на основе предельного качества LQ.

28. ГОСТ Р 50779.44-2001. Статистические методы. Показатели возможностей процессов. Основные методы расчёта.

29. ГОСТ Р 50779.40-96. Статистические методы. Контрольные карты. Общее руководство и введение.

30. ГОСТ Р 50779.43-99. Статистические методы. Приемочные контрольные карты.

31. ГОСТ Р 50779.45-2002. Статистические методы. Контрольные карты кумулятивных сумм. Основные положения.

32. ГОСТ Р 50779.74-99. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля и карты контроля по количественному признаку для процента несоответствующих единиц продукции.

33. ГОСТ Р ИСО 6879-2005. Качество воздуха. Характеристики и соответствующие им понятия, относящиеся к методам измерений качества воздуха.

34. ГОСТ Р 51170-98. Качество служебной информации. Термины и определения.

Приложение Б

(*обязательное*)

Глоссарий надёжности

Таблица Б – Глоссарий надёжности

№	Термин	Содержание термина
1	**Безопасность** Safety	Свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для объекта и окружающей среды
2	**Безотказность** Reliability, failure – free operation	Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки
3	**Вероятность безотказной работы** Reliability function, survival function	Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает
4	**Вероятность восстановления** Probability of restoration, maintainability	Вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение
5	**Вероятность успешного перехода на резерв** Probability of successful redundancy	Вероятность того, что переход на резерв произойдет без отказа объекта, т.е. за время, не превышающее допустимого значения перерыва в функционировании и/или без снижения качества функционирования
6	**Восстановление** Restoration, recovery	Процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния
7	**Время восстановления** Restoration time	Продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта
8	**Время восстановления гамма-процентное** Gamma-percentile restoration time	Время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью γ, выраженной в процентах
9	**Время восстановления среднее** Mean restoration time	Математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа
10	**Выходные параметры** Output Parameters	Числовые показатели технических характеристик машины, которые определяют её состояние и возможности по выполнению заданных функций
11	**Деградация параметра** Parameter degradation	Изменение выходного параметра объекта в результате воздействий процессов старения

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
12	**Дефект** Defect	Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта
13	**Дефект технологический** Birth defect	Несоответствие изготовленной продукции установленным требованиям
14	**Долговечность** Durability, longevity	Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта
15	**Дублирование** Duplication	Резервирование с кратностью резерва один к одному
16	**Закон надёжности** Time-to-failure law	Закон распределения сроков службы (или наработки) до отказа
17	**Запас надёжности** Reliability margin	Отношение предельно допустимого значения заданного параметра к его экстремальному фактическому значению
18	**Износ линейный** Linear wear	Величина износа, измеренная в направлении, перпендикулярном к поверхности трения
19	**Износ сопряжения** Joint wear	Изменение относительного положения сопряженных тел в результате износа их поверхностей трения
20	**Интенсивность восстановления** (Instantaneous) rate	Условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определённая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено
21	**Интенсивность отказов** Failure rate	Условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник
22	**Исправное состояние. Исправность** Good state	Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и/или конструктивной (проектной) документации
23	**Испытания на надёжность** Reliability test	Проверка объекта путём реального определения или подтверждения его характеристик надёжности. В зависимости от исследуемого свойства различают испытания на безотказность, ремонтопригодность, сохраняемость и долговечность (ресурсные испытания)

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
24	**Испытания на надёжность контрольные** Compliance test	Испытания, проводимые для контроля показателей надёжности
25	**Испытания на надёжность лабораторные** Laboratory test	Испытания, проводимые в лабораторных или заводских условиях
26	**Испытания на надёжность нормальные** Normal test	Лабораторные (стендовые) испытаний, методы и условия, проведения которых максимально приближены к эксплуатационным для объекта
27	**Испытания на надёжность определительные** Determination test	Испытания, проводимые для определения показателей надёжности с заданными точностью и достоверностью
28	**Испытания на надёжность ускоренные** Accelerated test	Лабораторные (стендовые) испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение информации о надёжности в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях
29	**Испытания на надёжность эксплуатационные** Field test	Испытания, проводимые в условиях эксплуатации объекта
30	**Испытательно-диагностический комплекс** Test-and-diagnostic complex	Комплекс, предназначенный для проведения программных испытаний и состоящий из измерительной и диагностической аппаратуры, программных нагрузочных устройств, ЭВМ, информационных и управляющих систем и объекта испытания
31	**Качество** Quality	Совокупность свойств, определяющих степень пригодности изделия для его использования по назначению
32	**Контроль надёжности** Reliability verification	Проверка соответствия объекта заданным требованиям к надёжности
33	**Коррозия** Corrosion	Разрушение твердых тел, вызванное химическими и электрохимическими процессами, развивающимися на поверхности тела при его взаимодействии с внешней средой. Распространенный вид – ржавление железа

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
34	**Коэффициент готовности** (Instantaneous) 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
35	**Коэффициент оперативной готовности** 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
36	**Коэффициент сохранения эффективности** Efficiency ratio	Отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определённую продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают
37	**Коэффициент технического использования** Steady state availability factor	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
38	**Кратность резерва** Redundancy ratio	Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими элементов, выраженное несокращенной дробью
39	**Критерий предельного состояния** Limiting state criterion	Признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документацией. В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
40	**Критерий отказа** Failure criterion	Признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации
41	**Критичность отказа** Failure criticality	Совокупность признаков, характеризующих последствия отказа. Классификация критичности (например, по уровню прямых и косвенных потерь, связанных с наступлением отказа, или по трудоемкости восстановления после отказа) устанавливается нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документацией по согласованию с заказчиком на основании технико-экономических соображений и соображений безопасности
42	**Метод определения надёжности расчётный** Analytical reliability assessment	Метод, основанный на вычислении показателей надёжности по справочным данным о надёжности компонентов комплектующих элементов объекта, по данным о надёжности объектов-аналогов, по данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту оценки надёжности
43	**Метод определения надёжности расчётно-экспериментальный** Analytical-experimental reliability assessment	Метод, при котором показатели надёжности всех или некоторых составных частей объекта определяют по результатам испытаний и/или эксплуатации, а показатели надёжности объекта в целом рассматривают по математической модели
44	**Метод определения надёжности экспериментальный** Experimental reliability assessment	Метод, основанный на статистической обработке данных, получаемых при испытаниях или эксплуатации объекта в целом. Аналогично определяют соответствующие методы контроля надёжности
45	**Методы Монте-Карло** Monte-Carlo methods	Численные методы решения математических задач при помощи моделирования случайных величин и статистической оценки их характеристик

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
46	**Модель** Model	Образец, отображение, имеющее наряду с безусловно-истинным условно-истинное, предположительно-истинное и ложное содержание; реализующееся и развивающееся в процессе его практического использования
47	**Модель динамическая** Dynamic model	Модель, отображающая процессы, происходящие в системе со временем, например модели функционирования и развития
48	**Модель локальная** Local model	Фрагмент конструкции, включающий часть или весь опасный объём, в пределах которого обеспечена идентичность параметров и технологии изготовления, а также удовлетворяются условия подобия параметров, характеризующих процесс накопления повреждений
49	**Модель математическая** Mathematical model	Абстрактная или знаковая модель, построенная средствами математики, например в виде системы уравнений, графа, логической формулы и т. п.
50	**Модель моделей** Model of models	Иерархия моделей; многоуровневая абстракция; число уровней в иерархии моделей моделей связывается с развитостью системы
51	**Модель отказа** Failure model	Математическое описание процесса формирования закона распределения показателя для определения на этой основе реального показателя надёжности
52	**Модель отказа статистическая** Statistical failure model	Модель отказа, использующая для описания закона надёжности статистическую информацию из сферы эксплуатации или результаты испытания изделий
53	**Модель реальная (вещественная, физическая, предметная)** Substantional model	Модель, построенная из реальных объектов; подобие реальной модели и оригинала может быть прямым, косвенным и условным
54	**Модель состава системы** Partition model	Модель, описывающая, из каких подсистем и элементов состоит система
55	**Модель структуры системы** Structural model	Модель, описывающая все отношения (связи) между элементами модели состава системы

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
56	**Модель функциональная** Model of functioning	Модель, описывающая процессы, которые характеризуют систему как часть более общей, охватывающей её системы, т. е. связанные с назначением данной системы
57	**Модель «чёрного ящика»** Black-box-model	Модель, описывающая только входы и выходы системы, но не внутреннее устройство системы. Например, математическая модель «черного ящика» – это просто совокупность множеств X и Y (X соответствует входам, Y-выходам)
58	**Надёжность** Reliability, dependability	Свойство объекта сохранять по времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость или определённые сочетания этих свойств
59	**Наработка** Operating lime	Продолжительность или объём работы объекта. Наработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т. п.).
60	**Наработка до отказа** Operating time to failure	Наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа
61	**Наработка до отказа гамма-процентная** Gamma-percentile operating time to failure	Наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ, выраженной в процентах
62	**Наработка до отказа средняя** Mean operating time to failure	Математическое ожидание наработки объекта до первого отказа

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
63	**Наработка между отказами** Operating time between failures	Наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа
64	**Наработка на отказ средняя. Наработка на отказ** Mean operating time between failures	Отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки
65	**Неисправное состояние. Неисправность** Fault, faulty state	Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации
66	**Неработоспособное состояние. Неработоспособность** 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. Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состоянии выделяют частично неработоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции
67	**Нормирование надёжности** Reliability specification	Установление в нормативно-технической документации и/или конструкторской (проектной) документации количественных и качественных требований к надёжности. Нормирование надёжности включает выбор номенклатуры нормируемых показателей надёжности; технико-экономическое обоснование значений показателей надёжности объекта и его составных частей; задание требований к точности и достоверности исходных данных; формулирование критериев отказов, повреждений и предельных состояний; задание требований к методам контроля надёжности на всех этапах жизненного цикла объекта

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
68	**Область работоспособности** Availability area	Область допустимых значений выходных параметров изделия
69	**Область состояний** State area	Область, в которой с заданной вероятностью находятся выходные параметры изделия
70	**Обслуживание техническое** Maintenance	Комплекс операций по контролю и поддержанию работоспособного и исправного состояния объекта
71	**Восстанавливаемый объект** Restorable item	Объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации
72	**Невосстанавливаемый объект** Nonrestorable item	Объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации
73	**Объект необслуживаемый** Nonmaintainable item	Объект, для которого проведение технического обслуживания не предусмотрено нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документацией
74	**Объект неремонтируемый** Nonrepairable item	Объект, ремонт которого невозможен или не предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и/или конструкторской (проектной) документацией
75	**Объект обслуживаемый** Maintainable item	Объект, для которого проведение технического обслуживания предусмотрено нормативно-технической документацией и/или конструкторской (проектной) документацией
76	**Объект ремонтируемый** Repairable item	Объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и/или конструкторской (проектной) документацией
77	**Объём испытаний на надёжность** Scope of reliability test	Характеристика плана испытаний на надёжность, включающая число испытываемых образцов, суммарную продолжительность испытаний в единицах наработки и/или число серий испытаний

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
78	**Определение надёжности** Reliability assessment	Определение численных значений показателей надёжности объекта
79	**Отказ** Failure	Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта
80	**Внезапный отказ** Sudden failure	Отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта
81	**Отказ деградационный** 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
82	**Отказ зависимый** Secondary failure	Отказ, обусловленный другими отказами
83	**Отказ конструктивный** Design failure	Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и/или норм проектирования и конструирования
84	**Отказ независимый** Primary failure	Отказ, не обусловленный другими отказами
85	**Отказ параметрический** Parameter related failure	Отказ, причина которого заключается в выходе регламентированного параметра за установленные пределы
86	**Отказ постепенный** Gradual failure	Отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта
87	**Отказ перемежающийся** Intermittent failure	Многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера
88	**Отказ производственный** Manufacturing failure	Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии
89	**Отказ ресурсный** Marginal failure	Отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
90	**Отказ скрытый** Latent failure	Отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики
91	**Отказ эксплуатационный** Misuse failure, mishandling failure	Отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и/или условий эксплуатации
92	**Отказ явный** 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
93	**Параметрическая надёжность** Parametric reliability	Надёжность, связанная не с отказом функционирования изделия, а с изменением его выходных параметров
94	**Параметр потока отказов** Failure intensity	Отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки
95	**Параметр потока отказов осреднённый** Mean failure intensity	Отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки. Все показатели безотказности (как приводимые ниже другие показатели надёжности) определены как вероятностные характеристики. Их статистические аналоги определяют методами математической статистики
96	**План испытаний на надёжность** Reliability test programme	Совокупности правил, устанавливающих объём выборки, порядок проведения испытаний, критерии их завершения и принятия решений по результатам испытаний
97	**Планово-предупредительная система ремонта** Preventive (or Scheduled) maintenance system	Система ремонта и технического обслуживания, при которой заранее назначается продолжительность межремонтных периодов и характер проводимых мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособности машины

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
98	**Повреждение** Damage	Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния
99	**Показатель надёжности** Reliability measure	Количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надёжность объекта
100	**Показатель надёжности единичный** Simple reliability measure	Показатель надёжности, характеризующий одно из свойств, составляющих надёжность объекта
101	**Показатель надёжности комплексный** Integrated reliability measure	Показатель надёжности, характеризующий несколько свойств, составляющих надёжность объекта
102	**Показатель надёжности нормируемый** Specified reliability measure	Показатель надёжности, значение которого регламентировано нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документацией на объект. В качестве нормируемых показателей надёжности могут быть использованы один или несколько показателей в зависимости от назначения объекта, степени его ответственности, условий эксплуатации, последствий возможных отказов, ограничений на затраты, а также от соотношения затрат на обеспечение надёжности объекта и затрат на его техническое обслуживание и ремонт. По согласованию между заказчиком и разработчиком (изготовителем) допускается нормировать показатели надёжности, не включённые в настоящий стандарт, которые не противоречат определениям показателей настоящего стандарта. Значения нормируемых показателей надёжности учитывают, в частности, при назначении цены объекта, гарантийного срока и гарантийной наработки
103	**Показатель надёжности расчётный** Predicted reliability measure	Показатель надёжности, значения которого определяются расчётным методом

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
104	**Показатель надёжности экспериментальный** Assessed reliability measure	Показатель надёжности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний
105	**Показатель надёжности эксплуатационный** Observed reliability measure	Показатель надёжности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации
106	**Показатель надёжности экстраполированный** Extrapolated reliability measure	Показатель надёжности, точечная или интервальная оценка которого определяется на основании результатов расчётов, испытаний и/или эксплуатационных данных путём экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации
107	**Последствия отказа** Failure effect	Явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта
108	**Предельно допустимое значение выходного параметра** Output parameter limit value	Граница области работоспособности, при выходе за пределы которой происходит отказ
109	**Предельное состояние** Limit State	Состояние изделия, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно
110	**Причина отказа** Failure cause	Явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта
111	**Программа обеспечения надёжности** Reliability support programme	Документ, устанавливающий комплекс взаимосвязанных организационно-технических требований и мероприятий, подлежащих проведению на определённых стадиях жизненного цикла объекта и направленных на обеспечение заданных требований к надёжности и/или на повышение надёжности
112	**Программный метод испытаний** Programmed Test Method	Автоматизированный метод оценки качества и параметрической надёжности машины во всем диапазоне режимов и условий её работы с учётом вероятностной природы внешних воздействий

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
113	**Процессы старения** Ageing Processes	Необратимые изменения свойств или состояния материала изделия
114	**Работоспособное состояние. Работоспособность** Up state	Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации
115	**Резерв** Reserve	Совокупность дополнительных средств и/или возможностей, используемых для резервирования
116	**Резерв нагруженный** Active reserve, loaded reserve	Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента
117	**Резерв ненагруженный** Standby reserve, unloaded reserve	Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функции основного элемента
118	**Резерв облегченный** Reduced reserve	Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент
119	**Резервирование** Redundancy	Способ обеспечения надёжности объекта за счёт использования дополнительных средств и/или возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций
120	**Резервирование замещением** Standby redundancy	Резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента
121	**Резервирование без восстановления** Redundancy without restoration	Резервирование, при котором восстановление отказавших основных и/или резервных элементов технически невозможно без нарушения работоспособности объекта в целом и/или не предусмотрено эксплуатационной документацией
122	**Резервирование общее** Whole system redundancy	Резервирование, при котором резервируется объект в целом

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
123	**Резервирование постоянное** Continuous redundancy	Резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключения
124	**Резервирование раздельное** Segregated redundancy	Резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы
125	**Резервирование с восстановлением** Redundancy with restoration	Резервирование, при котором восстановление отказавших основных и/или резервных элементов технически возможно без нарушения работоспособности объекта в целом и предусмотрено эксплуатационной документацией
126	**Резервирование скользящее** Sliding redundancy	Резервирование замещением, при котором группа основных элементов резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой из отказавших элементов данной группы
127	**Резервирование смешанное** Combined redundancy	Сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте
128	**Ремонт** Repair	Комплекс мероприятий по восстановлению работоспособного состояния объектов
129	**Ремонтопригодность** Maintainability	Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём технического обслуживания и ремонта
130	**Ресурс** Useful life, life	Суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние
131	**Гамма-процентный ресурс** Gamma-percentile life	Суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ, выраженной в процентах
132	**Назначенный ресурс** Assigned operating time	Суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
133	**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)
134	**Средний ресурс** Mean life, mean useful life	Математическое ожидание ресурса
135	**Сбой** Interruption	Самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора
136	**Сложная система** Complex System	Объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы, каждый из которых также выполняет определённые функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы
137	**Структура ремонтного цикла** Repair Cycle	Последовательность принятых ремонтных работ на протяжении всего периода эксплуатации изделия
138	**Предельное состояние** Limiting state	Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно
139	**Сохраняемость** Storability	Свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и/или транспортирования
140	**Срок службы** Useful lifetime, lifetime	Календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние
141	**Срок службы гамма-процентный** Gamma-percentile lifetime	Календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ, выраженной в процентах

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
142	**Срок службы назначенный** Assigned lifetime	Календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния
143	**Срок службы средний** Mean lifetime	Математическое ожидание срока службы. При использовании показателей долговечности следует указывать начало отсчёта 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)
144	**Срок сохраняемости** Storability time, shelf life	Календарная продолжительность (или) транспортирования объекта, в которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтопригодности, установленным нормативно-технической документацией на объект
145	**Срок хранения назначенный** 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.

Продолжение табл. Б

№	Термин	Содержание термина
146	**Трудоемкость восстановления средняя** 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 учётом конструктивных особенностей объекта, его технического состояния и условий эксплуатации характеризуются оперативными показателями ремонтопригодности
147	**Усталость материала** Fatingue of metal	Изменение механических и физических свойств материала в результате действия циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций. Основной характеристикой сопротивления усталости является предел выносливости – наибольшее напряжение, при котором при заданном числе циклических воздействий разрушения не происходит
148	**Элемент основной** Major element	Элемент объекта, необходимый для выполнений требуемых функций без использования резерва
149	**Элемент резервируемый** Element under redundancy	Основной элемент, на случай отказа которого в объекте предусмотрены один или несколько резервных элементов
150	**Элемент резервный** Redundant element	Элемент, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего
151	**Эрозия** Erosion, fret, pitting	Полное или частичное разрушение или повреждение поверхности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апсин, В. П.* Моделирование процессов восстановления машин / В. П. Апсин, Л. В. Дехтеринский, С. Б. Норкин, В. М. Приходько. – М. : Транспорт, 1996. – 311 с.

2. *Баженов, С. П.* Основы эксплуатации и ремонта автомобилей и тракторов : учебник / С. П. Баженов, Б. Н. Казьмин, С. В. Носов ; под ред. С. П. Баженова. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2007. – 336 с.

3. *Бойцов, Б. В.* Надёжность шасси самолёта. – М. : Машиностроение, 1976. – 216 с.

4. *Болотин, В. В.* Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.

5. *Барзилович, Е. Ю.* Надёжность авиационных систем / Е. Ю. Барзилович, В. Г. Мезенцев, М. В. Савенков. – М. : Транспорт, 1982. – 182 с.

6. *Браун, Э. Д.* Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник / Э. Д. Браун, Н. А. Буше [и др.] ; под ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Наука и техника, 1995. – 778 с.

7. *Горяинов, В. Б.* Математическая статистика : учебник / В. Б. Горяинов, И. В. Павлов, Г. М. Цветкова [и др.] ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 2-е изд., стер. – М. : Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2002. – 424 с.

8. *Гусев, А. С.* Расчёт конструкций при случайных воздействиях / А. С. Гусев, В. А. Светлицкий. – М. : Машиностроение, 1984. – 240 с.

9. *Гусев, А. С.* Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. – М. : Машиностроение, 1989. – 248 с.

10. *Григорович, В. Г.* Информационные методы в управлении качеством / В. Г. Григорович, С. В. Юдин, Н. О. Козлова, В. В. Шильдин. – М. : Стандарты и качество, 2001. – 208 с.

11. *Екобори, Т.* Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. – М. : Металлургия, 1971. – 264 с.

12. *Животкевич, И. Н.* Надёжность технических изделий / И. Н. Животкевич, А. П. Смирнов. – М. : Олита, 2003. – 472 с.

13. *Зорин, В. А.* Основы надёжности машин : учеб. пособие / А. Л. Бараш, В. А. Зорин, В. К. Фёдоров, П. И. Шерешов ; под ред. В. А. Зорина. – Балашиха : ВТУ, 2004. – 130 с.

14. *Зорин*, *В. А.* Основы работоспособности технических систем. – М. : Академия, 2009. – 208 с.

15. *Зубарев*, *Ю. М.* Технологическое обеспечение надёжности эксплуатации машин : учеб. пособие. – СПб. : Лань, 2016. – 320 с.

16. *Зубарев*, *Ю. М.* Основы надёжности машин и сложных систем : учебник. – СПб. : Лань, 2017. – 180 с.

17. *Когаев*, *В. П.* Прочность и износостойкость деталей машин / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М. : Высш. шк., 1991. – 319 с.

18. *Коллакот*, *Р.* Диагностика повреждений : пер с англ. – М. : Мир, 1989. – 512 с.

19. *Котик*, *М. А.* Природа ошибок человека-оператора (на примерах управления транспортными средствами) / М. А. Котик, А. М. Емельянов. – М. : Транспорт, 1993. – 252 с.

20. *Кох*, *П. И.* Климат и надёжность машин. – М. : Машиностроение, 1981. – 175 с.

21. *Крыжановский*, *Г. А.* Совершенствование профессиональной подготовки лётного и диспетчерского составов / Г. А. Крыжановский, Г. В. Коваленко, Н. Н. Сухих, Ю. Е. Хорошавцев ; под ред. Г. А. Крыжановского. – М. : Транспорт, 1996. – 320 с.

22. *Кузнецов*, *Е. С.* Управление техническими системами : учеб. пособие. – М. : МАДИ (ТУ), 1997. – 177 с.

23. *Луизова*, *Л. А.* От постановки задачи до принятия решения: учебное пособие по планированию эксперимента и статистической обработке его результатов для инженеров-физиков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2003. – 100 с.

24. *Лукинский*, *В. С.* Прогнозирование надёжности автомобилей / В. С. Лукинский, Е. И. Зайцев. – Л. : Политехника, 1991. – 224 с.

25. Надёжность в машиностроении : справочник / под. ред. В. В. Шашкина, Г. П. Корзова. – СПб. : Политехника, 1992. – 424 с.

26. Надёжность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / председатель редсовета В. Е. Авдуевский. – М. : Машиностроение, 1986–1990.

27. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2005. – 656 с.

28. *Острейковский*, *В. А.* Теория надёжности : учебник. – М. : Высш. шк., 2003. – 464 с.

29. *Перегудов*, *Ф. И.* Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – М. : Высш. шк., 1989. – 367 с.

30. *Плудек*, *В*. Защита от коррозии на стадии проектирования : пер. с англ. – М. : Мир, 1980. – 438 с.

31. *Почтенный*, *Е. К*. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. – Минск : Наука и техника, 1983. – 249 с.

32. *Проников*, *А. С*. Надёжность машин. – М. : Машиностроение, 1978. – 590 с.

33. *Проников*, *А. С*. Параметрическая надёжность машин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.

34. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / под ред. А. Н. Савоськина. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.

35. *Пугачёв*, *В. С*. Теория вероятности и математическая статистика. – М. : Наука, 1979. – 496 с.

36. *Решенкин*, *А. С*. Эффективность применения средств неразрушающего контроля и диагностики // Грузовик &. – 2007. – № 2. – С. 11–14.

37. *Сапожников*, *В. В*. Основы технической диагностики : учеб. пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2004. – 318 с.

38. *Северцев*, *Н. А*. Статистические задачи отработки систем и таблицы для числовых расчётов показателей надёжности / Н. А. Северцев, В. Н. Титулов, Ю. М. Чесноков, Р. С. Судаков ; под ред. Р. С. Судакова. – М. : Высш. шк., 1975. – 604 с.

39. *Северцев*, *Н. А*. Системный анализ теории безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – М. : Теис, 2009. – 452 с.

40. *Сигорский*, *В. П*. Математический аппарат инженера. – Киев : Техника, 1975. – 768 с.

41. Справочник по инженерной психологии / под ред. Б. Ф. Ломова. – М. : Машиностроение, 1982. – 368 с.

42. *Сырицын*, *Т. А*. Эксплуатация и надёжность гидро- и пневмоприводов. – М. : Машиностроение, 1990. – 248 с.

43. *Труханов*, *В. М*. Надёжность изделий машиностроения. Теория и практика. – М. : Машиностроение, 1996. – 336 с.

44. *Устич*, *П. А*. Надёжность рельсового нетягового подвижного состава / П. А. Устич, В. А. Карпычев, М. Н. Овечников. – М. : Вариант, 1999. – 416 с.

45. *Четвергов, В. А.* Надёжность локомотивов / В. А. Четвергов, А. Д. Пузанков. – М. : Маршрут, 2003. – 415 с.

46. *Шеридан, Т. Б.* Системы человек – машина: Модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором / Т. Б. Шеридан, У. Р. Феррелл ; под ред. К. В. Фролова ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1980. – 400 с.

47. *Шибанов, Г. П.* Количественная оценка деятельности человека в системах человек – техника. – М. : Машиностроение, 1983. – 263 с.

48. *Щурин, К. В.* Комбинированный метод определения характеристик сопротивления усталости крупногабаритных сварных рам // Вестник машиностроения. – 1990. – № 9. – С. 9–11.

49. *Щурин, К. В.* Моделирование сварных конструкций ходовых осей на испытаниях на усталость / К. В. Щурин, Ю. В. Перчаткин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1990. – № 10. – С. 122–126.

50. *Щурин, К. В.* Оценка параметров локальной модели и силонагружателя при стендовых испытаниях рам транспортных средств на усталость / К. В. Щурин, В. И. Рассоха, В. Ю. Филиппов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1992. – № 1–3. – С. 79–84.

51. *Щурин, К. В.* Автоматизированный расчёт на прочность пространственных конструкций, состоящих из плоских элементов : учеб. пособие / К. В. Щурин, В. И. Чепасов, М. А. Токарева. – Оренбург : Изд-во ОГУ, 1998. – 240 с.

52. *Щурин, К. В.* Повышение долговечности транспортных машин : учеб. пособие / В. А. Бондаренко, К. В. Щурин, Н. Н. Якунин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1999. – 144 с.

53. *Щурин, К. В.* Проблема надёжности в философском аспекте // Credo news. – СПб., 2002. – № 4. – С. 186–200.

54. *Щурин, К. В.* Основы теории надёжности мобильных машин : учеб. пособие. – М. : МГУЛ, 2004. – 216 с.

55. *Щурин, К. В.* Надёжность: качество, распределённое во времени // РЖД-Партнёр. – 2006. – № 6. – С. 82–86.

56. *Щурин, К. В.* Социотехническое регулирование надёжности // Стандарты и качество. – 2007. – № 4. – С. 32–37.

57. *Щурин*, *К. В*. Роль потребителя в управлении качеством продукции научного приборостроения / К. В. Щурин, Я. Г. Прима // Стандарты и качество. – 2008. – № 1. – С. 68–71.

58. *Щурин*, *К. В*. Надёжность мобильных машин. – Оренбург : Изд-во ОГУ, 2010. – 585 с.

59. *Щурин*, *К. В*. Методика и практика планирования и организации эксперимента : практикум : учеб. пособие / К. В. Щурин, Д. А. Косых. – Оренбург : Университет, 2012. – 184 с.

60. *Щурин*, *К. В*. Управление качеством в историко-философском аспекте : учеб. пособие / К. В. Щурин, А. Л. Воробьёв, Д. А. Косых. – Оренбург : Университет. – 2013. – 232 с.

Константин Владимирович ЩУРИН

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Учебное пособие

Зав. редакцией
инженерно-технической литературы *Е. В. Баженова*
Корректор *Ю. Н. Теплова*
Выпускающий *Н. А. Крылова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
196105, Санкт-Петербург, пр. Ю. Гагарина, д. 1, лит. А.
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 07.05.19.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108 $^{1}/_{32}$.
Печать офсетная. Усл. п. л. 31,08. Тираж 100 экз.

Заказ № 348-19.

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета
в АО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.

Константин Владимирович ЩУРИН

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Учебное пособие

Зав. редакцией
инженерно-технической литературы *Е. В. Баженова*
Корректор *Ю. Н. Теплова*
Выпускающий *Н. А. Крылова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
196105, Санкт-Петербург, пр. Ю. Гагарина, д. 1, лит. А.
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 07.05.19.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108 $^{1}/_{32}$.
Печать офсетная. Усл. п. л. 31,08. Тираж 100 экз.

Заказ № 348-19.

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета
в АО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.