

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БАРАНОВИЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**В. М. БЛАГОДАРНЫЙ  
В. И. КОЧУРКО**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ  
И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Монография**

**Рекомендовано к печати  
научно-методическим советом университета**

**Барановичи  
РИО БарГУ  
2010**

УДК 621.01:9.06-192:62-19(035.3)

ББК 34.41я73

Б68

А в т о р ы:

*В. М. Благодарный, В. И. Кочурко*

Р е ц е н з е н т ы:

*А. И. Кочергин*, профессор, кандидат технических наук,  
профессор кафедры «Металлорежущие станки»  
учреждения образования «Белорусский национальный  
технический университет»;

*М. Ф. Пашкевич*, профессор, доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технология машиностроения»  
учреждения образования «Белорусско-Российский  
университет»

**Благодарный, В. М.**

**Б68 Прогнозирование надежности и функциональной безопасности технических систем** [Текст] : монография / В. М. Благодарный, В. И. Кочурко. — Барановичи : РИО БарГУ, 2010. — 256, [4] с. : ил. — 110 экз. — ISBN 978-985-498-397-4.

В монографии рассмотрены вопросы прогнозирования надежности технических систем, критерии оценки их работоспособности. Даны сведения по ускоренным методам испытаний технических систем и их элементов, приведены примеры прогнозирования технических систем.

Данное издание предназначено в качестве вспомогательного материала для студентов технических специальностей вузов, изучающих предмет «Надежность и диагностика технических систем».

Табл. 7. Рис. 57.

УДК 621.01:9.06-192:62-19(035.3)

ББК 34.41я73

ISBN 978-985-498-397-4

© Благодарный В. М., Кочурко В. И., 2010

© БарГУ, 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Введение</i> .....	5
Г л а в а 1 Основные понятия: техносфера, техника, система, техническая и технологическая системы, надежность, диагностика, функциональная безопасность .....	8
Г л а в а 2 Общие сведения о надежности технологических систем .....	17
2.1 Технологическая система и ее надежность .....	17
2.2 Элементы технологической системы .....	24
2.3 Влияние технических и эксплуатационных параметров на надежность станков .....	26
2.4 Процессы, происходящие в станках .....	27
2.5 Простой станков и автоматических линий .....	31
2.6 Оценка надежности технологических процессов по показателям качества .....	33
2.7 Формирование постепенных отказов .....	37
Г л а в а 3 Состояние вопроса прогнозирования и оценки надежности технических систем .....	40
Г л а в а 4 Концепция «слабого» элемента технической системы и основные принципы системного подхода при оценке ее надежности .....	60
Г л а в а 5 Модель технической системы и ее системный анализ .....	64
Г л а в а 6 Целевая функция технической системы и показатели функционирования .....	69
Г л а в а 7 Конструкторская документация как источник информации для прогнозирования надежности технической системы .....	73
Г л а в а 8 Анализ структурной значимости элементов технической системы ..	76
Г л а в а 9 Расчет комплексного показателя функционирования элемента ..	80
Г л а в а 10 Определение функциональной значимости элементов и формирование группы функционально значимых элементов .....	82
Г л а в а 11 Субстанции и критерии работоспособности элемента .....	89
Г л а в а 12 Анализ работоспособности функционально значимых элементов и прогнозирование конструкторской надежности технической системы .....	94
Г л а в а 13 Основные законы, используемые в теории надежности .....	104
Г л а в а 14 Влияние свойств материалов деталей на их надежность .....	112
14.1 Применение новых материалов для повышения надежности машин .....	114

	14.2 Выход из строя деталей машин (отказы) по критерию прочности . . . . .	117
Г л а в а 15	Оценка предельного состояния по критерию прочности . . . . .	123
	15.1 Общие сведения . . . . .	123
	15.2 Гипотезы усталостных разрушений . . . . .	126
	15.3 Оценка усталостных характеристик в зависимости от скорости распространения трещины . . . . .	129
	15.4 Вероятностные методы расчета усталостных характеристик . . . . .	130
	15.5 Оценка усталостных характеристик ускоренными методами испытаний . . . . .	134
Г л а в а 16	Надежность по критерию износостойкости и методы ее оценки и прогнозирования . . . . .	138
	16.1 Износостойкость и методы ее оценки . . . . .	138
	16.2 Классификация процессов изнашивания . . . . .	144
	16.3 Основные закономерности изнашивания материалов . . . . .	147
Г л а в а 17	Ускоренные испытания по критерию износа . . . . .	151
	17.1 Общие сведения . . . . .	151
	17.2 Энергетическая концепция ускоренных испытаний . . . . .	152
	17.3 Запас работоспособности детали . . . . .	153
	17.4 Определение предельного режима испытаний . . . . .	156
Г л а в а 18	Вероятностный расчет работоспособности зубчатых передач по критерию износа . . . . .	155
	18.1 Кривая изнашивания сопряжения . . . . .	155
	18.2 Расчетная схема нормального изнашивания . . . . .	159
	18.3 Расчет зубьев колес на надежность по критерию износа . . . . .	162
	18.4 Расчет надежности зубчатого редуктора по критерию точности . . . . .	165
	18.5 Вероятностный расчет механизма, содержащего мелко-модульные зубчатые передачи, по критерию точности . . . . .	168
Г л а в а 19	Диагностика технических систем . . . . .	169
Г л а в а 20	Примеры технической диагностики . . . . .	186
	20.1 Техническая диагностика авиационных двигателей . . . . .	187
	20.2 Техническая диагностика судовых механизмов . . . . .	188
	20.3 Техническая диагностика поршневых двигателей . . . . .	188
	20.4 Применение кинематомеров для диагностики станков и передач . . . . .	189
Г л а в а 21	Функциональная безопасность технических систем . . . . .	193
	21.1 Общие сведения о безопасности технических систем . . . . .	194
	21.2 Методы прогнозирования функциональной безопасности технических систем . . . . .	230
	21.3 Экологическая безопасность технических систем . . . . .	238
	<i>Заключение</i> . . . . .	253
	Список источников . . . . .	254
	Перечень нормативно-технических документов . . . . .	257

## Введение

Актуальной проблемой, решение которой позволяет значительно сократить материальные затраты при создании новой техники, ускорить внедрение прогрессивных конструкций, повысить их надежность, является прогнозирование надежности технических систем на ранних стадиях проектирования, дающее возможность конструктору оперативно принять меры к исправлению проекта изделия еще до его изготовления.

Повышение надежности изделий всегда является актуальным, так как это связано как с развитием технического прогресса, так и с экономикой.

Современные технические системы состоят из большого числа взаимодействующих элементов, механизмов, аппаратов и приборов. Например, в современных автоматизированных проектных комплексах насчитывается более полумиллиона деталей. Современные системы радиоуправления ракетами имеют десятки миллионов элементов, тогда как первые простейшие машины и радиоприемники состояли только из десятка или сотен деталей [49]. Отказ хотя бы одного ответственного элемента сложной системы без резервирования может привести к нарушению работы всей системы, браку при изготовлении изделий, простоям оборудования, прекращению снабжения населения электроэнергией, газом, водой, иногда к аварии, связанной с опасностью для человеческой жизни.

При решении многих задач, возникающих перед заказчиками и разработчиками систем управления потенциально опасными объектами, к которым, в частности, относятся различного рода средства передвижения (от космических до подземных и подводных), встанут проблемы обоснования показателей и критериев надежности и безопасности, отражающих разные свойства создаваемых систем. Все свойства, входящие в понятие «качество» изделия (технической системы), неразрывно связаны между собой, но в то же время каждое из них имеет свою индивидуальность, отличительные черты, проявляющиеся при использовании технической системы по целевому назначению. Это, в первую очередь, относится к свойствам надежности и безопасности, которые, несмотря на некоторую близость, имеют принципиальные различия. Функциональная безопасность связана с надежностью. Именно отказ технической системы может представить опасность как для человека, так и для окружающей среды, поэтому будем рассматривать безопасность технической системы не вообще, а с точки зрения лишь ее функциональных свойств. По вопросу безопасности жизнедеятельности существует большое количество литературы, а вот проблема функциональной безопасности отражена недостаточно полно.

В настоящее время такие ученые, как Ю. П. Адлер, Г. Г. Азгальдов, А. В. Глинчев, Л. Г. Дубицкий, В. Г. Версан, В. И. Сиськов, В. Н. Фомин, Г. И. Федоренко (Россия),

Э. Деминг, В. Шьюхарт (США) и другие сформировали научное направление «Управление качеством продукции», в рамках которого выделяются исследования статистических методов анализа качества и надежности. Прежде всего это работы Ю. К. Беляева, Б. В. Гнеденко, В. А. Лапидуса и их учеников, связанные с совершенствованием планов статистического контроля качества, и исследования Ю. Н. Благовещенского, В. В. Баскакова, М. Липова, Н. Манна, Нельсона, Р. С. Судакова (Россия), В. М. Скрипника (Беларусь), О. И. Тескина, В. Шьюхета (США), посвященные оцениванию объектов по выборкам малого объема (в том числе по цензурированным выборкам). В исследованиях Г. В. Дружинина, В. А. Острейковского, Г. С. Садыхова, Г. Н. Черкесова, Ю. В. Швыряева, Р. Т. Исламова (Россия), П. Расмуссена, Р. Барлоу, Ф. Прошана, Х. Кумамото, Э. Хенли (США, Великобритания) предложены современные методы вероятностного анализа безопасности, которые позволяют рассчитать вероятность аварийных ситуаций на стадии проектирования технических систем. Исследования указанных авторов создали предпосылки для разработки методологии оперативного управления безопасностью технических систем по данным эксплуатации путем статистического анализа нарушений.

В предлагаемой монографии более подробно рассмотрена функциональная безопасность технических систем. В последнее время происходит довольно много техногенных катастроф, влекущих за собой серьезные потери (как людские, так и материальные). Достаточно вспомнить крушения самолетов и железнодорожных поездов в различных частях света, приведшие к гибели сотен людей, бесчисленные аварии автомобильного транспорта, беспрецедентную аварию нефтяного трубопровода в Мексиканском заливе и многие др. Они происходят как по причине внезапных отказов технических систем, так и по вине обслуживающего персонала, поэтому одним из важных структурных элементов в технической системе с точки зрения ее безопасности является человек. Несмотря на то что в литературе по надежности подчеркивается обычно высокая надежность современной системы электроснабжения, в 1965 г. в США произошла исключительная по масштабам авария, которая оставила огромную часть территории страны с населением 40 млн человек без света, электрической энергии и электротранспорта на 10 ч. Причиной аварии был выход из строя небольшого реле на распределительном щите одной из гидроэлектростанций.

Ошибки персонала при проведении испытаний реактора привели к величайшей трагедии XX в. — взрыву Чернобыльской атомной станции. И таких примеров можно привести множество. Увеличение числа и масштабов последствий техногенных аварий и катастроф обусловлено не только ростом сложности производства с применением новых технологий, требующих высоких концентраций энергии, опасных для жизни человека веществ и оказывающих заметное воздействие на компоненты окружающей среды, но и крупными структурными изменениями в экономике страны, которые привели к сбою в сфере финансирования, высоким и прогрессирующим уровнем износа и старения основных фондов (например, в машиностроении, химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности износ составил 80—100%), падением производственной и технологической дисциплины и снижением квалификации работников, неисполнением графиков ремонта и замены оборудования, упрощением регламентного обслуживания.

В некоторых промышленно развитых стран изучение безопасности технических систем как отдельной независимой научно-технической проблемы было

введено в практику в 60-е гг. XX в. (в качестве примера можно привести деятельность США, начиная с 50-х гг., по созданию системы безопасности авиационно-космической техники). Центр внимания переместился от анализа поведения отдельных элементов различного типа (электрических, механических, гидравлических) на причины и последствия, вызываемые отказом этих элементов в соответствующей системе. «Дерево отказов», «Дерево последствий», «Метод последовательной экспертизы», «Экспертные оценки» и другие методы выявления отказов были взяты на вооружение специалистами, работающими в химической и других опасных отраслях промышленности, из сферы военных и аэрокосмических исследований [50]. Именно в этих странах 60-е гг. XX в. были отмечены началом широкой публикации научных работ, относящихся к описываемой области исследований. В нашей стране такие работы (это касается открытой печати, доступной широкому кругу научно-технических работников) имели единичные издания, что следовало из концепции «абсолютной безопасности» отечественных технологий и оборудования.

Требование «абсолютной безопасности» («нулевого риска») в итоге привело к дорогостоящим и даже трагическим последствиям для населения и экономики страны. Специалисты, эксплуатирующие технические системы и обслуживающие опасные технологии в химической промышленности, системы энергетики и трубопроводный транспорт, оказались неподготовленными в методическом плане к поиску и анализу критических отказов, приводящих к авариям. Уровень знаний о безопасности жизнедеятельности в техносфере отстал от уровня сложности и темпов развития техники, технологий, технических систем.

В России в настоящее время интенсивно ведутся работы в сфере обеспечения безопасности эксплуатации технических систем, разрабатываются методики, направленные на определение надежности технических систем, оценку риска, совершенствуется нормативно-правовая база; осуществляется переход от регистрации свершившегося факта к осознанию необходимости использования инженерных методов предварительного анализа и исследования технических систем и объектов повышенного риска с целью предупреждения аварий. Ясно, что в изменившихся условиях подход к решению проблем безопасности производств, экологических проблем, основанный на концепции «реагировать и выправлять», вынужден уступить место новому, где главенствующим является принцип «предвидеть и предупреждать» [50]. Необходимо прогнозировать техногенную деятельность для предотвращения того ее предельного негативного масштаба, превышение которого оборачивается трагедией, катастрофами и экологическим ущербом. На сегодняшний день по подсчетам специалистов на территории России размещены свыше 4,5 тыс. потенциально опасных объектов, в том числе до 800 радиационно и примерно 1 500 химически и биологически опасных сооружений и производств, которые относятся к объектам повышенного риска [51].

Повышение надежности и безопасности машин является важнейшей задачей в машиностроении. В теории надежности рассматривают следующие обобщенные объекты: техносфера, техника, система, техническая и технологическая системы, надежность, диагностика, функциональная безопасность.

**Техносфера** — часть биосферы, преобразованная человеком в технические и техногенные объекты (машины и механизмы, сооружения и здания, горные выработки, дороги и т. д.) при помощи технических средств в целях наилучшего соответствия социально-экономическим потребностям человека.

**Техника** (от греч. *techné* — искусство, мастерство, умение) — совокупность средств человеческой деятельности, т. е. машин, механизмов, устройств, орудий. Техника создается на основе знаний и производственного опыта, накопленного человечеством в процессе развития производства. Она облегчает трудовые усилия человека и увеличивает их эффективность, позволяет преобразовывать природу в соответствии с потребностями общества. По мере развития производства техника последовательно заменяет человека в выполнении технологических функций, связанных с физическим и умственным трудом. Ее используют для воздействия на предметы труда при создании материальных и культурных благ, для получения, передачи и превращения энергии, исследования законов развития природы и общества, передвижения и связи, сбора, хранения, переработки и передачи информации, управления обществом, обслуживания быта, ведения войны и обеспечения обороноспособности.

По функциональному назначению различают технику производственную, военную, бытовую, медицинскую, для научных исследований, образования, культуры и др. Основную часть технических средств составляет производственная техника, к которой относятся

машины и механизмы, инструменты, аппаратура управления машинами и технологическими процессами, а также производственные здания и сооружения, коммуникации и т. д. Технику обычно классифицируют по отраслевой структуре производства (например, промышленности, транспорта) или применительно к отдельным структурным подразделениям производства. Например, техника авиационная, мелиоративная, энергетическая, химическая, горная и т. п. Техника все в большей мере становится материализацией научных знаний. Ее развитие выражается в разработке новых и усовершенствовании существующих типов машин, оборудования, в повышении технического уровня производств, процессов, их комплексной механизации и автоматизации, в создании новых материалов, топлива и преобразователей энергии и т. п. Исторически техника прошла путь развития от примитивных машин, выполняющих одну операцию, до сложнейших автоматических машин современного производства [1], объединенных в единое целое — систему, имеющую соответствующую структуру и направленную на достижение определенных целей.

Элемент является простейшей (при данном рассмотрении) составной частью объекта.

**Система** — совокупность действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Существуют различные системы: политические, организационные, технические, технологические и др. Будем рассматривать технические и технологические системы.

**Под технической системой (объектом)** понимается упорядоченная совокупность отдельных элементов, связанных между собой функционально и взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить выполнение некоторых заданных функций (достижение цели) при различных состояниях работоспособности.

Объектами могут быть различные системы и их элементы, в частности, сооружения, установки, технические изделия, устройства, машины, аппараты, приборы и их части, агрегаты и отдельные детали. Упорядоченность означает, что относительно окружающей среды система выступает и, соответственно, воспринимается как нечто функционально единое.

К простейшим техническим системам относятся детали, механизмы, машины, комплексы, конструкции и т. д. Неотъемлемым элементом таких систем может быть человек (оператор). Признаком системы

является структурированность, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели.

Необходимой принадлежностью системы является наличие связей (количественных и качественных) между ее элементами. Количество связей должно быть системообразующим, т. е. их число должно быть таким, чтобы обеспечивалась возможность решать цели системы.

Наличие связей является основным признаком системы, что отличает ее от конгломерата (набора, комплекса) элементов. Однако для обеспечения целей системы нет необходимости всегда учитывать все элементы и связи. При оценке надежности системы необходимо учитывать лишь основные элементы и связи, влияющие на надежность системы. Например, при установлении надежности системы «машина» в некоторых условиях внешней среды (условиях эксплуатации) можно ограничиться определением показателей надежности ее деталей или узлов и установлением связей между наработками этих элементов, не рассматривая таких элементов системы, как кристаллографическая структура элементов этих деталей и узлов. В то же время, если цель исследования состоит в определении физических основ отказов, следует учитывать структуру материалов.

Таким образом, в каждом конкретном исследовании (в зависимости от его цели) из всех элементов и связей нужно выделять только основные, позволяющие строить иерархические зависимости.

Однако следует учитывать, что чрезмерное упрощение может привести к тому, что системный подход окажется неэффективным и не сможет обеспечить достижение цели исследования.

Обязательным компонентом любой системы являются составляющие элементы (подсистемы), а само понятие элемента условно и относительно, так как любой элемент, всегда можно рассматривать как совокупность других элементов.

Поскольку все подсистемы и элементы, из которых состоит система, определенным образом взаиморасположены и взаимосвязаны, образуя данную систему, можно говорить о структуре системы.

**Структура системы** — это то, что остается неизменным в системе при изменении ее состояния, при реализации различных форм поведения, при совершении системой операций и т. п.

**Изделие** — единица продукции, выпускаемая данным предприятием, цехом и т. д. (например, подшипник, ремень, станок, автомобиль).

Любая система имеет, как правило, иерархическую структуру, т. е. может быть представлена в виде совокупности подсистем разного уровня, расположенных в порядке постепенности. При анализе тех или иных конкретных систем достаточным оказывается выделение некоторого определенного числа ступеней иерархии.

Системы функционируют в пространстве и во времени. Процесс функционирования систем представляет собой изменение состояния системы, переход ее из одного состояния в другое. В соответствии с этим системы подразделяются на статические и динамические.

*Статическая система* — система с одним возможным состоянием. *Динамическая система* — система с множеством состояний, в которой с течением времени происходит переход от состояния в состояние.

С позиций безопасности задачи исследования технических систем заключаются в том, чтобы увидеть, каким образом элементы системы функционируют в системе во взаимодействии с другими ее частями и по каким причинам может произойти отказ, грозящий негативными последствиями для окружающей среды.

**Технологическая система** представляет собой разновидность технической системы, обеспечивающей выполнение определенных технологических функций. Можно выделить технологические системы для выполнения отдельных операций, технических или производственных процессов. В последнем случае в технологическую систему входит весь комплекс технических средств предприятия, включая производственных и вспомогательных рабочих, работников инженерно-технических служб и административно-хозяйственный персонал, обеспечивающий производство определенных видов изделий.

**Система обеспечения надежности** — комплекс организационно-технических и экономических мероприятий, методов и средств, направленных на систематизацию уровня надежности технических систем.

Все системы подразделяются на простые и сложные.

*Простыми* являются системы, которые выполняют свои функции или обеспечивают выполнение всех своих целей строго детерминировано. К ним относятся автоматические системы, станки с числовым программным управлением (ЧПУ), часы, автоматизированные системы управления производством и др. Функционирование таких систем может быть описано дифференциальными уравнениями [2].

Все системы, функционирование которых не носит детерминированного характера, относят к категории *сложных*.

Совокупность разнородных сложных систем образует большую систему. Большими системами являются все человеко-машинные комплексы. Технические и технологические системы могут относиться как к категории простых, так и к категории сложных систем. Система обеспечения надежности — это большая организационно-техническая система [3].

Каждый объект характеризуется эксплуатационными показателями, которые для различных машин, станков и автоматических линий называют *выходными параметрами*. Они представляют собой показатели точности, жесткости, виброустойчивости, экономичности и т. д. Допустимые значения выходных параметров устанавливаются технической документацией.

Объект может находиться в следующих состояниях: исправном и неисправном, работоспособном и неработоспособном.

**Исправным состоянием** называют такое состояние, при котором объект соответствует всем требованиям, установленным технической документацией.

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

**Работоспособное состояние (работоспособность)** — состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных технической документацией.

*Неработоспособное состояние (неработоспособность)* характеризуется тем, что значение хотя бы одного параметра объекта вышло за допустимые пределы.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности, называется **отказом**, который может быть охарактеризован как полной потерей работоспособности объекта, так и частичной.

Время работы объекта может быть оценено двумя способами: *сроком службы* (календарной продолжительностью эксплуатации); *наработкой* (продолжительностью работы), которая измеряется часами, числом циклов, пройденным путем, количеством изготовленных изделий.

**Надежность** — свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения эксплуатационных показателей в заданных пределах (согласно ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Термины и определения). Она является комплексным свойством, которое может

проявляться через такие показатели, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, а также включать определенные сочетания этих свойств (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 — Показатели надежности

**Безотказность** — показатель надежности, характеризующий свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой определенной наработки или времени. Она характеризуется вероятностью безотказной работы, интенсивностью отказов.

**Долговечность** характеризует свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, при котором дальнейшая его эксплуатация становится невозможной из-за снижения эффективности, выхода параметров за допустимые пределы, нарушений требований техники безопасности. Долговечность оценивается такими параметрами, как время безотказной работы, срок службы в часах, наработка до отказа, ресурс,  $\gamma$ -процентный ресурс.

**Ремонтпригодность** характеризует свойство объекта, заключающееся в приспособленности и пригодности объекта к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и повреждений, а также к устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Основными параметрами (показателями) ремонтпригодности являются среднее время восстановления  $T_B$ , вероятность восстановления в заданное время  $P_B(t)$ , интенсивность восстановления  $\lambda_B(t)$ .

**Сохраняемость** характеризует свойство объекта сохранять требуемые эксплуатационные показатели после установленного срока хранения и транспортирования. Практическая роль этого свойства

особенно велика для приборов и вооружения (боеприпасов). Так, по американским источникам, во время второй мировой войны около 50% радиоэлектронного оборудования для военных нужд и запасных частей к нему вышли из строя в процессе хранения [1].

Для автоматических линий и других сложных систем основным комплексным показателем надежности является **коэффициент технического использования** — отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период к сумме этой наработки и времени всех простоев для ремонтов и технического обслуживания.

Огромные средства затрачиваются в мире для того, чтобы машинный парк находился в работоспособном состоянии. Создание ремонтных предприятий и заводов по изготовлению запасных частей, применение многоцелевых служб по ремонту и техническому обслуживанию машин, включая системы информации, транспортировки и снабжения, — все это является следствием того, что машины теряют свою работоспособность из-за процессов изнашивания, коррозии, усталостного разрушения и других процессов, приводящих к «старению».

По разным источникам на ремонт и техническое обслуживание машин за все время их эксплуатации затрачивается в 5—10 раз больше средств, чем на изготовление новых [4]. В индустриально развитых странах приблизительно 4,5% валового национального дохода тратится на трение, износ и коррозию подвижных соединений технических изделий. Это приводит к потерям сырьевых материалов и энергии общей стоимостью в несколько сотен миллиардов долларов ежегодно во всем мире.

Особенно велики потери от недостаточной надежности уникальных машин. При выходе их из строя по непредвиденным обстоятельствам велика роль последствий для людей и окружающей среды: гибель людей в результате авиационных или других катастроф, отказы военной техники в ответственные моменты, необратимые разрушения окружающей среды. Достаточно вспомнить такие трагические события, как гибель космического корабля «Челленджер» и подводной лодки «Курск».

Совсем недавно на Азовском море произошли крушения танкеров, которые привели к сильнейшему загрязнению как самого моря, так и его берегов, в результате чего погибло много рыбы, птиц и других обитателей моря. В мире постоянно проходят многочисленные аварии и катастрофы. Статистика показывает, что в мире ежегодно проис-

ходит около 1 200 крупных аварий на судах, почти столько же на железных дорогах, на дне мирового океана после аварий находится более 50 ядерных боеголовок, более 10 ядерных реакторов и огромное количество мин и снарядов после первой и второй мировых войн [4].

Надежность машины, включая ее поведение в экстремальных ситуациях, является одним из основных факторов в проблеме безопасности.

Нарушение работоспособности и выход из строя технических средств связаны не только с вопросами безопасности и экономическими затратами, но и оказывают непосредственное влияние на окружающую среду и экологическую обстановку на нашей планете.

Выбросы в атмосферу вредных веществ (автотранспортом, авиацией, металлургией, ТЭЦ и др.), тепловые воздействия на окружающую среду, отходы смазочных материалов и износившихся деталей машин, последствия аварий, особенно если это связано с радиоактивным заражением (авария на АЭС, на атомных подводных лодках), загрязнение морских и океанских гряд при аварии нефтяных танкеров, пожары, вызванные, например, падением самолета, и другие аналогичные события зависят непосредственно от уровня надежности технических устройств.

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

Для оценки и прогнозирования надежности объектов должны быть назначены определенные параметры, по которым можно оценивать работоспособность объекта. Анализом технического состояния объекта занимается диагностика.

Техническая диагностика сравнительно молодая наука, возникшая во второй половине XX в. в связи с потребностями техники. Постоянно возрастающее значение сложных и дорогостоящих технических систем, особенно в машиностроении и радиоэлектронике, требования безопасности, надежности делают весьма важной оценку состояния системы.

**Техническая диагностика** — наука о распознавании состояния технической системы, включающая широкий круг проблем, связанных с получением и оценкой диагностической информации.

Термин «диагностика» произошел от слова «диагноз» (медицинского термина) — определение болезни на основании исследования больного (от греч. «*диагносис*» — распознавание, определение).

Техническая диагностика изучает методы получения и оценки диагностической информации, диагностические модели и алгоритмы принятия решений. *Целью технической диагностики* является повышение надежности технических систем.

Как известно, наиболее важным показателем надежности является отсутствие отказов во время функционирования технической системы. Отказ авиационного двигателя в полете, судовых механизмов во время плавания корабля, энергетических установок в работе под нагрузкой может привести к тяжелым последствиям.

Техническая диагностика благодаря раннему обнаружению дефектов и неисправностей позволяет устранить подобные отказы в процессе технического обслуживания, что повышает надежность и эффективность эксплуатации, а также дает возможность эксплуатации технических систем ответственного назначения по состоянию.

В практике ресурс таких систем определяется по наиболее «слабым» экземплярам изделий. При эксплуатации по состоянию каждый экземпляр эксплуатируется до предельного состояния в соответствии с рекомендациями системы технической диагностики. Эксплуатация по техническому состоянию может принести выгоду, эквивалентную стоимости 30% общего парка машин [5].

Опасность — центральное понятие как сферы безопасности жизнедеятельности в техносфере, так и промышленной безопасности. **Под опасностью** понимаются явления, процессы, объекты, способные в определенных условиях наносить вред здоровью человека, ущерб окружающей природной среде и социально-экономической инфраструктуре, т. е. вызывать нежелательные последствия непосредственно или косвенно. Другими словами, опасность — следствие действия некоторых негативных (вредных и опасных) факторов на определенный объект (предмет) воздействия. При несоответствии характеристик воздействующих факторов характеристикам объекта (предмета) воздействия и появляется феномен опасности (например, ударная волна, аномальная температура, недостаток кислорода в воздухе, токсичные примеси в воздухе и т. п.).

Опасность — свойство, внутренне присущее сложной технической системе. Она может реализоваться в виде прямого или косвенного

ущерба для объекта (предмета) воздействия постепенно или внезапно и резко в результате отказа системы. Скрытая (потенциальная) опасность для человека реализуется в форме травм, которые происходят при несчастных случаях, авариях, пожарах и т. п., для технических систем — в форме разрушений, потери управляемости и т. д., для экологических систем — в виде загрязнений, утрате видового разнообразия и др.

**Определяющие признаки** — возможность непосредственного отрицательного воздействия на объект (предмет) воздействия, нарушения нормального состояния элементов производственного процесса, в результате которого могут возникнуть аварии, взрывы, пожары, травмы. Наличие хотя бы одного из указанных признаков является достаточным для отнесения факторов к разделу опасных или вредных. Количество признаков, характеризующих опасность, может быть увеличено или уменьшено в зависимости от целей анализа.

## 2

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 2.1 Технологическая система и ее надежность

**Технологическая система** — совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей, предназначенных для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических операций в соответствии с требованиями технологической документации. Все свойства, рассмотренные для технических систем, характерны и для технологических систем. Согласно определению в технологическую систему входят элементы, которые благодаря существующим между ними связям обеспечивают протекание технологических процессов. Таким образом, можно рассматривать технологическую систему для выполнения одной операции и технологическую систему для выполнения некоторого процесса, состоящего из отдельных операций. Например, в технологическую систему для автоматического точения будут входить станок, приспособление, инструмент, деталь (материал или заготовка), наладчик, рабочий.

В технологическую систему одной операции могут включаться также средства контроля и контролер. Технологическая система технологического процесса включает все элементы отдельных операций, а также средства внутривзаводского (или внутрицехового) транспорта, средства механизации и автоматизации вспомогательных операций и т. д.

В технологическую систему входят элементы, для которых обязательно наличие функциональных связей, обеспечивающих протекание технологических процессов изготовления продукции. Частным случаем таких связей являются кинематические связи между отдельными элементами (например, в системе станок — приспособление — инструмент — деталь).

**Под технологическим процессом** понимается часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства. Каждый технологический процесс состоит из отдельных операций. При этом **под технологической операцией** понимается законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте.

По функциональному или структурному признаку технологическую систему можно разделить на *подсистемы*. Например, систему для выполнения нескольких технологических процессов можно разделить на подсистемы, предназначенные для осуществления отдельных операций. Так, технологическую систему для сверления деталей образуют станок, приспособление, инструмент, деталь, рабочий-оператор, наладчик, средства контроля, источник информации (технологическая или конструкторская документация) и т. д.

Часть технологической системы, условно принимаемая неделимой на стадии ее анализа, называется **элементом системы**. Понятие элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной цели [1]. Машина при установлении ее собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов-механизмов, узлов и т. д., а при изучении надежности автоматической линии — как элемент. Таким образом, элементом можно считать инструмент, приспособление, средства транспортирования и контроля, рабочего-оператора, наладчика и т. д. Элементами также являются станок, автоматическая линия, автоматизированный участок из станков с ЧПУ и т. д.

Технологическая система может находиться в работоспособном и неработоспособном состоянии. *Работоспособным* считается такое

состояние системы, при котором она обеспечивает изготовление продукции при заданных условиях с показателями качества и ритмом выпуска, установленными в технологической документации.

**Надежность технологической системы** — свойство технологической системы выполнять заданные функции, сохраняя показатели качества и ритм выпуска годной продукции в течение требуемых промежутков времени эксплуатации или требуемой наработки.

**Ритм выпуска** — количество изделий определенного наименования, типоразмера и исполнения, выпускаемых в единицу времени.

Впервые термин «технологическая надежность станков» был введен профессором А. С. Прониковым [6]. Под понятиями «надежность технологического процесса» и «надежность технологической операции» следует понимать надежность технологической системы, обеспечивающей функционирование рассматриваемого процесса или операции в соответствии с требованиями технической документации.

Из определений следует, что технологическую систему можно считать надежной в том случае, если она обеспечивает выполнение задания по показателям качества изготавливаемой продукции и по параметрам производительности.

*Отказы технологической системы* можно рассматривать как функциональные и параметрические, собственные и вынужденные, по ритму первого типа (уменьшение ритма выпуска при отсутствии брака) и по ритму второго типа (уменьшение ритма выпуска при появлении брака).

В качестве *показателей надежности технологических систем* используются следующие:

– вероятность выполнения задания — вероятность того, что технологическая система обеспечивает выпуск предметов производства с заданными значениями показателей качества и ритмом за требуемый интервал времени при сохранении регламентированных условий производства;

– вероятность безотказной работы;

– вероятность выполнения задания за цикл функционирования;

– среднее время выполнения задания;

– вероятность выполнения задания по качеству;

– вероятность выполнения задания по ритму выпуска;

– наработка на отказ;

– параметр потока отказов;

- параметр потока функциональных отказов;
- параметр потока параметрических отказов;
- запас надежности;
- коэффициент технического использования;
- коэффициент готовности;
- предельно допустимые значения выходного параметра.

В зависимости от целей исследований и требований выбирается тот или иной показатель надежности технологической системы.

При решении задачи оценки надежности технологических систем исходят из следующих предпосылок [2]:

1) надежность технологических систем оценивается параметрами и показателями качества изготовленной продукции, уровень которых зависит от рассматриваемой операции. Например, при шлифовании вала оценка надежности операции производится по обеспеченности необходимого размера и шероховатости только обрабатываемой поверхности;

2) при расчете надежности технологических систем необходимо исходить из того, что в конструкторской документации однозначно заданы номинальные значения и показатели качества готового изделия. При оценке надежности технологических операций следует учитывать только то, насколько процесс изготовления обеспечивает соблюдение установленных требований и не рассматривать при этом соответствия современному уровню показателей, заложенному в конструкторской документации. Это значит, что технологический процесс может обладать высокой надежностью, хотя полученная при его реализации продукция может относиться ко второй категории качества;

3) при оценке надежности технологических систем в условиях серийного производства необходимо принимать во внимание технологические маршруты, режимы и средства технологического оснащения, заданные в технологической документации;

4) на этапе подготовки производства обработка технологических операций и процессов с целью обеспечения их надежности производится путем выбора лучшего технологического решения по требованиям экономичности и вероятности выполнения задания по показателям качества и изготовленной продукции и параметрам производительности.

*Оценка надежности* технологических систем сводится к дифференциальной оценке показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности или к вычислению (при необходимости) комплексных показателей, характеризующих одновременно все составные свойства надежности.

*Оценка безотказности* сводится к определению [2]:

– вероятности того, что рассматриваемый технологический процесс (операция) обеспечит изготовление продукции в соответствии с требуемыми технической документацией показателями качества в течение заданного интервала времени без вынужденных перерывов при одновременном обеспечении заданного объема производства в единицу времени (ритма выпуска);

- средней наработки до отказа;
- параметра потока отказов.

При оценке показателей безотказности не учитываются вынужденные простои оборудования, обусловленные организационными причинами.

Для непрерывных технологических операций за наработку принимается продолжительность работы (час), для дискретных технологических операций (обработка резанием, штамповка и т. п.) — число обработанных деталей или прутков (при изготовлении деталей из пруткового материала).

При оценке безотказности автоматических линий, а также технологических операций за единицу наработки принимается количество изготовленных деталей после финишной операции.

Операция контроля должна рассматриваться как неотъемлемая часть соответствующих технологических операций.

Отказом технологической системы по показателям качества не следует считать произошедшее после операции обработки отклонение от требований технической документации по одному из показателей качества, выявленное при контрольной операции, в результате чего дефектная деталь или изолирована, или направлена на доработку (переработку). При оценке безотказности по параметрам производительности время изготовления дефектной продукции должно учитываться как время, затраченное на устранение отказа.

Для дорогостоящих и трудоемких в изготовлении изделий безотказность должна оцениваться для операции обработки и отдельно — для контрольной операции.

*Оценка долговечности* сводится к определению:

- календарной продолжительности функционирования технологической системы до отказа, капитального ремонта, между ремонтами, до полной замены;

- наработок системы до тех же периодов.

*Оценка ремонтпригодности* технологической системы сводится к установлению:

- показателей, характеризующих продолжительность и стоимость выявления и устранения отказов;

- времени, требуемого для приведения системы в рабочее состояние;

- показателей, характеризующих трудоемкость и стоимость операций технического обслуживания технологических систем, подналадок, смены инструмента.

Оценка надежности технологических систем проводится путем вычисления показателей надежности на этапах технологической подготовки производства, серийного изготовления, а также после капитального ремонта или модернизации важнейших элементов технологических систем.

Основная цель оценок надежности технологических систем — приведение технологических процессов в такое состояние, при котором обеспечивается изготовление продукции в соответствии с установленными в технической документации параметрами и показателями качества при одновременном обеспечении максимальной производительности и минимуме потерь от брака. В зависимости от этапа проведения оценок могут решаться частные задачи:

- при планировании — установление объемов производства отдельных участков и цехов, определение экономически обоснованных норм точности;

- при технологической подготовке производства — выбор оптимальных технологических процессов (режимов обработки, установление мест контрольных операций в технологическом процессе и планов контроля);

- при серийном производстве — определение соответствия параметров технологической системы установленным требованиям, выявление отрицательных факторов и разработка мероприятий по повышению надежности или точности и стабильности технологических процессов;

- после проведения ремонтов технологических систем — оценка качества ремонта.

Эти же методы могут быть использованы для организации приемосдаточных испытаний после ремонта основных элементов технологических систем или после их модернизации.

Технологическая система состоит из оборудования, станков, машин и других устройств, от работоспособности которых зависит выполнение задания, поэтому, кроме обеспечения надежности выполнения технологических операций и производительности, необходимо обеспечить надежность всех элементов, входящих в технологическую систему. Эти элементы, как правило, теряют свою работоспособность из-за потери точности, усталостных поломок и износа. В соответствии с этими причинами выхода деталей из строя необходимо назначить критерии работоспособности деталей и разработать методы оценки работоспособности деталей по этим критериям.

По структуре технологические системы бывают одноканальными и многоканальными, разомкнутыми и замкнутыми [3]. В структуру одноканальной системы входит лишь один элемент (рис. 2.1).

В состав многоканальной системы входит несколько одноканальных параллельно функционирующих элементов (рис. 2.2), обеспечивающих выполнение заданного ритма при обработке одинаковых заготовок (например, многопоточная автоматическая линия). В разомкнутой технологической системе число предметов производства не регламентировано (например, при бесцентровом шлифовании с питанием заготовками, поступающими из вибробункера) (рис. 2.3).

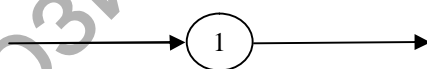


Рисунок 2.1 — Одноканальные системы

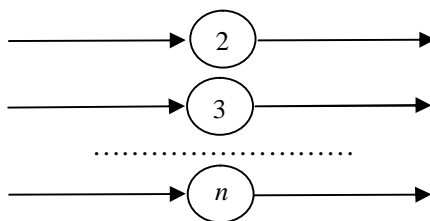


Рисунок 2.2 — Многоканальная технологическая система

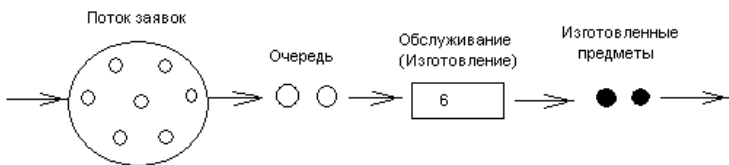


Рисунок 2.3 — Разомкнутая технологическая система

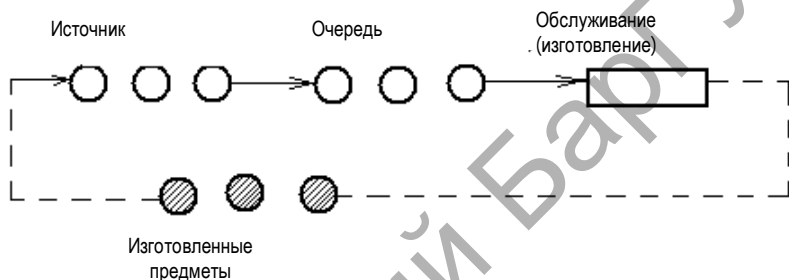


Рисунок 2.4 — Замкнутая технологическая система

В замкнутой технологической системе число заявок (предметов изготовления) регламентировано (рис. 2.4), что имеет место в системе наладок станков на участке.

## 2.2 Элементы технологической системы

### Станок как элемент технологической системы

Металлорежущие станки различаются по функциям, конструкциям, уровню автоматизации, техническим параметрам, габаритам, массе и другим характеристикам, оказывающим существенное влияние на их надежность и способы ее обеспечения.

Металлорежущий станок состоит из большого числа элементов, в которых происходят сложные физико-химические процессы. На этапе изучения, расчета и обеспечения надежности станок целесообразно рассматривать как совокупность взаимосвязанных систем,

различающихся видом элементов, характером нагрузок, физикой отказов, уровнем и способом обеспечения их надежности. Таким образом, станок — сложная система, состоящая из целого ряда подсистем. В некоторых случаях удобно производить деление станка на подсистемы по функциональному признаку, т. е. на двигательную, передаточную, транспортную, инструментальную, измерительную, информационную, подачи смазывающее-охлаждающей жидкости (СОЖ) и др.

Системы первого и второго видов принадлежат к восстанавливаемым и состоят из восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов. Характер производства элементов разнообразен: от массового (подшипники качения, гидравлическая аппаратура, режущие инструменты и т. д.) до единичного (шпиндели, корпусные детали и т. п.). Сами станки и автоматические линии во многих случаях являются уникальными изделиями, что не дает возможности выделять для их испытаний представительную выборку (т. е. партию объектов для проведения массовых испытаний).

Существенные различия между станками, их системными требованиями и элементами требуют использования в каждом случае наиболее подходящих методов испытаний, расчета и обеспечения надежности [3].

### **Автоматическая линия как элемент технологической системы**

Автоматическая линия в основном состоит из таких же систем и элементов, что и станок. Однако количество элементов в ее системе в десятки и сотни раз больше, чем в системах металлорежущих станков. Количество электрических и гидравлических элементов, входящих в состав автоматической линии, равно сотням и тысячам. Например, в автоматической линии ЛМ-150 использовано 12 750 электрических аппаратов, в том числе 1 387 выключателей, 281 контакторов, 515 сигнальных ламп, 1 972 промежуточных реле [3].

Автоматические линии часто состоят из десятков станков и различных агрегатов. Например, автоматическая линия ЛМ-172 Минского завода, обрабатывающая 4 детали за один цикл, состоит из 15 станков. Кроме того, в линию входят 5 гидростанций, 2 контрольные станции и другое оборудование. В линии работают 27 силовых головок и столов со сверлильными, расточными, обточными, резьбонарезными, подрезными и фрезерными бабками. Станки этой линии имеют 124 шпинделя и оснащены 184 инструментами.

Наблюдения за автоматическими линиями и автоматизированными сложными станками в условиях эксплуатации показали, что входящие в их состав детали, аппараты, приборы, инструменты подвержены отказам разных видов и подчиняются различным законам распределения.

### **Автоматический комплекс из станков с числовым программным управлением как элемент технологической системы**

**Автоматизированный комплекс** — гибкая станочная система, предназначенная для обработки деталей определенного класса, состоящая из станков с ЧПУ и общих для них систем обслуживания, которые объединены централизованной системой управления оборудованием и ходом производства.

Состав и структура автоматизированных комплексов зависит от номенклатуры обрабатываемых деталей. В автоматизированных комплексах имеются различные транспортно-загрузочные и накопительные системы, которые обеспечивают станки заготовками, технологической оснасткой и технологической документацией.

Контроль точности обрабатываемых деталей производится автоматическими устройствами.

## **2.3 Влияние технических и эксплуатационных параметров на надежность станков**

---

Все факторы, оказывающие влияние на надежность станков, автоматических линий и их конструктивных единиц, можно разделить на технические и эксплуатационные. Технические факторы делятся на конструктивные и технологические.

*Конструктивные факторы* формируются в процессе конструирования изделия. К ним относятся выбор структуры изделия, учет действующих нагрузок, определение конструктивных форм и размеров деталей, выбор материалов деталей и определение требований к качеству изготовления, подбор комплектующих элементов, определение требований к конструктивным единицам изделия и т. д. Так, по данным американских источников [7], 90% конструкций после

их изготовления оказываются неработоспособными из-за перечисленных выше факторов и требуют доработки.

*Технологические факторы* формируются в процессе изготовления деталей, сборки конструктивных единиц, сборки и отладки станка или всей автоматической линии. К ним относятся обеспечение точности изготовления деталей и заданного качества их поверхностного слоя, выполнение требований к конструктивным единицам, соблюдение заданного режима обработки и др.

*Эксплуатационные факторы* обусловлены процессом эксплуатации. К ним относятся выполнение требований к помещениям для станков, использованию станков по назначению, соблюдение правил ухода за станками и планово-предупредительного ремонта (ППР). Человека, работающего за станком, следует рассматривать как важнейший эксплуатационный фактор, который может повышать или понижать надежность их по сравнению с уровнем, прогнозируемым на стадии проектирования.

Результаты анализа нескольких тысяч аварий и поломок станков показали следующее: 12% отказов произошло из-за недостатков конструкции, 11% — дали дефекты изготовления, 77% отказов случилось из-за неправильной эксплуатации [3].

Очевидно, изменение во времени характеристик технологических систем может приводить к изменению не только качества изготовления продукции, но и производительности. Отказы технологических систем в большинстве случаев приводят как к появлению бракованных изделий, так и к задержке в выполнении задания, что сказывается на производительности оборудования, поэтому, характеризуя свойство надежности технологических систем, целесообразно рассматривать его с точки зрения выполнения заданий как по показателям качества, так и по объему изготавливаемой продукции.

## 2.4 Процессы, происходящие в станках

.....

В цеху на элементы станка воздействуют нагрузки и окружающая среда. Нагрузки — это силы резания, силы трения в кинематических парах. На электрические и электронные элементы действует электрическое напряжение. При расчете элементов и при испытании их на надежность необходимо учитывать характер изменения нагрузки.

На рисунке 2.5, *а* показано изменение момента сил полезного сопротивления в период врезания при строгании, долблении, точении валов с канавками, когда нагрузка на валах привода возникает мгновенно, а затем остается неизменной. Зависимость на рисунке 2.5, *б* характеризует постепенное нарастание момента сил при врезании. Изменение его при фрезеровании описывается выправленной синусоидой (рис. 2.5, *в*). В ряде случаев нагрузка представляет собой совокупность периодически повторяющихся кратковременных импульсов (рис. 2.5, *г*). «Выбросы» нагрузки за предельно допустимый уровень возникают в случайные моменты времени. Если не приняты специальные меры, «выбросы» обычно приводят к отказу какого-либо элемента системы.

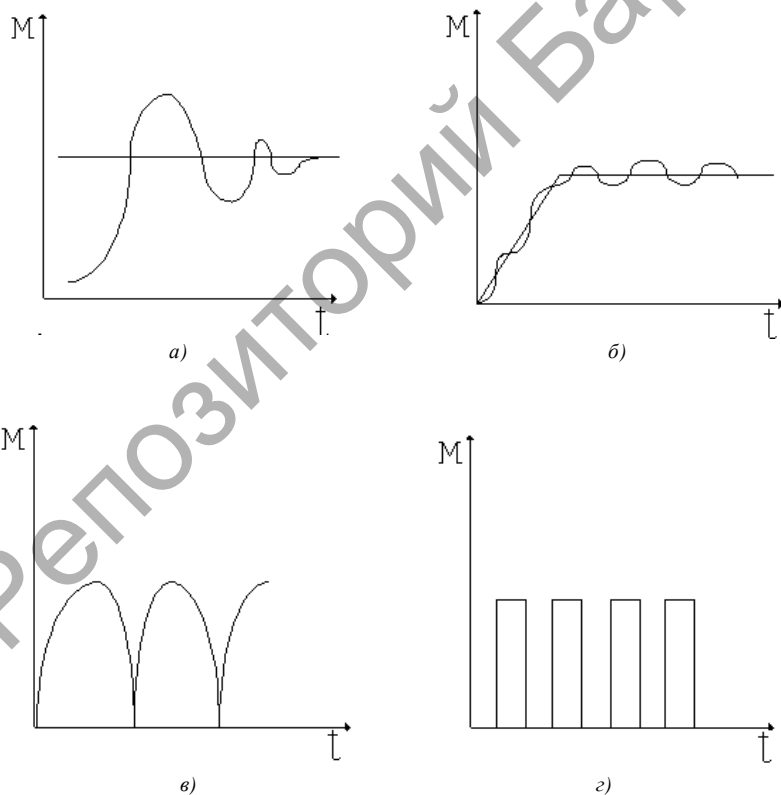


Рисунок 2.5 — Частные случаи изменения нагрузки

Влияние окружающей среды на надежность станка можно показать на схеме (рис. 2.6).

Внутренние и внешние воздействия вызывают в элементах станка процессы, ухудшающие эксплуатационные показатели. В зависимости от скорости протекания все процессы можно разделить на три группы [4]:

- 1) быстропротекающие;
- 2) средней скорости;
- 3) медленнопротекающие.

*Быстропротекающие процессы* продолжаются в течение цикла работы станка и заканчиваются с его прекращением. К ним относятся колебания нагрузок, упругие деформации, вибрации узлов, изменение сил трения и др.

Быстропротекающие процессы приводят к изменению шероховатости поверхности и рассеиванию размеров обработанных на станке деталей.

Станок является упругой системой. При нагружении его элементы деформируются в пределах упругих деформаций, а при снятии нагрузок — полностью восстанавливаются. Способность элементов сопротивляться появлению упругих деформаций под действием нагрузок называется **жесткостью**.

Жесткость — важнейшая составляющая качества станков. Она в значительной мере определяет точность и производительность процессов обработки.



Рисунок 2.6 — Влияние факторов окружающей среды на надежность станка

*Переменность* сил резания, в основном являющаяся результатом колебаний припуска и физико-механических свойств обрабатываемого материала, приводит к *рассеиванию* точности обработки.

В станке могут возникать вибрации, которые ухудшают шероховатость поверхностей обрабатываемых деталей, вызывают рассеивание размеров и поломку инструментов, снижают долговечность станка.

Под действием внешних периодических сил, которые обусловлены прерывистостью процесса резания и дисбалансом (неуравновешенностью) вращающихся деталей, возникают вынужденные колебания.

Параметрические колебания появляются из-за изменения жесткости детали во время ее вращения, например, при наличии шпоночной канавки.

В токарных, шлифовальных и других станках, работающих на высоких режимах, возникают автоколебания, вызванные процессом резания.

Переменность сил трения в подвижных соединениях также влияет на точность обработки, например, вызывает рассеивание межосевых расстояний отверстий, обработанных на координатно-сверлильном станке.

*Процессы средней скорости* продолжаются в течение периода бесподналадочной работы, т. е. в течение нескольких минут или часов. К ним относятся изменение температуры станка, износ режущего инструмента.

*Медленно протекающие процессы* развиваются с начала эксплуатации станка, но их результаты становятся ощутимыми за периоды работы между ремонтами станка. К ним относятся: изнашивание основных деталей, перераспределение внутренних напряжений и вызываемые этим коробление ответственных деталей, коррозия, старение пластмасс, резины, рабочей жидкости, смазочных масс, электромагнитной аппаратуры и др. Медленно протекающие процессы приводят к прогрессивному ухудшению технических характеристик станков, называемому *физическим старением*. Скорость старения определяется как первоначальным качеством станка, так и качеством обслуживания.

На работоспособность станка наиболее влияние оказывает изнашивание его деталей.

**Изнашивание** — процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала и (или) его остаточной деформации. Результатом изнашивания является износ.

Преимущественное влияние износа на ухудшение эксплуатационных свойств станков можно объяснить большим количеством трущихся поверхностей, многие из которых трудно или невозможно защитить от пыли, стружки, СОЖ. Износ приводит к потере точности станка, снижению прочности элементов станка, падению КПД гидроагрегатов и увеличению утечек в гидроаппаратах вследствие увеличения зазоров.

## 2.5 Простои станков и автоматических линий

---

Простои металлорежущего оборудования делят на простои, связанные с техническими причинами (технические простои), техническим обслуживанием, организационными причинами, плановым и внеплановым ремонтом.

*Технические простои* обусловлены отказами элементов оборудования и рассматриваются для следующих систем: механической, гидравлической, пневматической, электрической, электронной, подачи СОЖ и др.

Одним из основных понятий теории надежности является **отказ** — нарушение работоспособного состояния технического устройства из-за прекращения функционирования или резкого изменения его параметров. В теории надежности оценивается вероятность отказа, т. е. возможность того, что техническое средство откажет в течение заданного времени работы. Для современных технических систем интенсивность отказов лежит в пределах  $10^{10} \text{ ч}^{-1}$ . Теория надежности позволяет оценивать срок службы, по окончании которого техническое средство вырабатывает свой ресурс и должно подвергнуться капитальному ремонту, модернизации или замене. После выработки ресурса техническая система должна быть выведена из эксплуатации, однако на практике довольно часто этого не происходит. Например, если средний ресурс металлорежущего оборудования составляет примерно 8—10 лет, то на многих предприятиях можно встретить станки, у которых срок службы давно истек, но они продолжают эксплуатироваться. В СССР существовал государственный строгий контроль по срокам службы авиационных двигателей и самолетов вообще, но с распадом страны и в связи с тем, что появились частные

авиационные компании, которые закупили старые самолеты и начали их активно эксплуатировать эта система перестала нормально функционировать. В результате увеличилось число авиакатастроф по причинам технических неполадок. Отказы технических систем представляют определенную опасность для людей и окружающего пространства.

По характеру изменения выходного параметра элемента отказы делятся на внезапные и постепенные.

**Внезапные отказы** — скачкообразные выходы одного или ряда параметров за допустимые пределы. Они возникают в результате сочетания неблагоприятных условий и случайных внешних воздействий, превышающих возможности станка. Таким образом происходят поломки режущих инструментов, пружин, разрывы трубопроводов и т. п. В настоящее время моменты наступления внезапных отказов прогнозировать не удастся.

**Постепенные отказы** — отказы, вызванные сравнительно медленными изменениями параметров элемента. Они связаны с изнашиванием, короблением, тепловыми деформациями элементов, а также с регулированием ответственных узлов. По скорости изменения параметров станка или его узла момент постепенного отказа можно предсказать.

По характеру связи между собой отказы делятся на зависимые и независимые.

*Зависимый отказ* возникает вследствие отказа других элементов станка, связанных с данным.

*Независимый отказ* возникает независимо от состояния других элементов.

В зависимости от возможности использования изделия после нарушения работоспособности отказы делятся на полные и частичные.

В случае *полного отказа* дальнейшее использование изделия невозможно, а при *частичном отказе* изделие можно использовать, но с учетом того, что лишь один или более его параметров вышли за допустимые пределы, а остальные параметры находятся в допустимых пределах.

По характеру проявления отказы делятся на *устойчивые* и *самоустраняющиеся*. К последним относятся сбои, время существования которых значительно меньше времени безотказной работы. Они характерны, например, для электронных систем станков с ЧПУ.

По причинам возникновения отказы делятся на *конструктивные, технологические и эксплуатационные*. Причинами конструктивных отказов являются ошибки конструктора, т. е. неверные определения расчетных нагрузок, неправильный выбор материала и т. д.

*Простои из-за технического обслуживания* делятся на плановые и внеплановые. Они связаны с проведением работ технического обслуживания, т. е. с пополнением систем охлаждающей и рабочей жидкостями, смазочным маслом, регулировкой положения упоров и измерительных преобразователей и т. п.

*Простои по организационным причинам* связаны с неправильной организацией эксплуатации оборудования (отсутствием на рабочем месте инструмента, заготовок, запасных частей, временным отключением электроэнергии и т. д.).

*Наложённые простои* технически исправного станка или участка возникают вследствие того, что простаивает оборудование другого станка или участка, технологически связанного с данным.

Соотношение между временем простоев разных видов оборудования зависит от его типа, надежности, организации производства на заводе и т. д. Установлено, например, что технические простои автоматических линий составляют 10—15%, а по организационным причинам — 15—30% годового фонда рабочего времени.

## **2.6 Оценка надежности технологических процессов по показателям качества**

---

Оценка надежности технологических процессов по показателям качества проводится по вероятности того, что в течение заданной наработки показатели качества продукции или нормированные параметры обработки находятся в пределах установленных допусков на всех операциях. Различные схемы технологических процессов показаны на рисунках 2.1—2.4.

Если вероятность выполнения задания по одному или нескольким показателям качества на операциях  $O_1, O_2, \dots, O_n$  соответственно равны  $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$ , то, при условии независимости погрешностей обработки на каждой операции, вероятность выполнения задания

по показателям качества технологических процессов в течение времени  $t$  составит

$$P(t) = \prod_{j=1}^n P_j(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t), \quad (2.1)$$

где  $P_j(t)$  — вероятность выполнения задания по показателям качества на  $j$ -й операции, входящей в рассматриваемый процесс.

В тех случаях, когда оценка  $P(t)$  проводится по параметру, подвергающемуся изменению на нескольких операциях, величина  $P(t)$  может быть выражена через параметры точности обработки рассматриваемого показателя на каждой операции.

Пусть исследуемый показатель (размер) последовательно формируется операциями  $O_1, O_2, \dots, O_{m-1}, O_m$ . Средние значения и средние квадратические отклонения погрешностей обработки на операциях  $O_1, O_2, \dots, O_{m-1}$  соответственно равны  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{m-1}; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{m-1}$ . Требуется определить среднее значение и среднее квадратическое отклонение для финишной операции  $O_m$ , т. е.  $\bar{x}_m$  и  $\sigma_m$  и вероятность выполнения задания  $P(t)$ .

Если погрешности обработки на операциях  $O_1, O_2, \dots, O_m$  попарно независимы, то

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_m &= \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{m-1}; \\ \sigma_m &= \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_{m-1}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Если погрешность обработки после финишной операции подчинена нормальному закону, то вероятность того, что к рассматриваемому моменту времени  $t$  размеры не будут выходить за пределы допуска, равна

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \int_{\delta_H}^{\delta_B} e^{-\frac{(x - \bar{x}_m)^2}{\sigma_m^2}} dx$$

или

$$P(t) = 1 - \left[ \Phi \left( \frac{\bar{x}_m - \bar{\delta}_H}{\sigma_m} \right) + \Phi \left( \frac{\bar{\delta}_B - \bar{x}_m}{\sigma_m} \right) \right], \quad (2.3)$$

где  $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  — табулированная функция;

$\bar{x}_m, \sigma_m$  — определяются по формулам (2.2).

Рассмотрим более общий случай, когда погрешности обработки на соседних операциях попарно зависимы, т. е. когда погрешность обработки на операции  $O_2$  зависит от погрешности обработки на операции  $O_1$ , на операции  $O_3$  — от погрешности на операции  $O_2$ , на операции  $O_4$  — от погрешности на операции  $O_3$  и т. д.

Пусть соответствующие коэффициенты корреляции соответственно равны  $r_{12}, r_{23}, \dots, r_{m-1}$ . В этом случае среднее квадратическое отклонение погрешности обработки на операции  $O_m$  будет определяться по формуле

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_{m-1}^2 + 2r_{12} \sigma_1 \sigma_2 + \dots + 2r_{m-2, m-1} \sigma_{m-2} \sigma_{m-1}}. \quad (2.4)$$

Вероятность выполнения задания по рассматриваемому показателю качества вычисляется по формуле (2.3).

Рассмотрим погрешность обработки после финишной операции замыкающим звеном размерной цепи, а погрешности обработки на предыдущих операциях — составляющими звеньями. Технологическую размерную цепь в большинстве практических случаев можно рассматривать как плоскую размерную цепь с независимыми или коррелятивно связанными звеньями. Для независимых звеньев поле рассеивания для замыкающего звена и координата середины поля рассеивания определяются из выражений

$$\omega_A = \frac{1}{\lambda_\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i \omega_i^2}; \quad \Delta_{\omega_\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left( \Delta_{\omega_i} + \frac{\alpha_i \omega_i}{2} \right) - \frac{\alpha_\Delta \omega_\Delta}{2}, \quad (2.5)$$

где  $\omega_{\Delta}$ ,  $\omega_i$  — поля рассеивания замыкающего и составляющего звеньев;  
 $\xi_i$  — передаточное отношение, характеризующее влияние погрешности обработки на  $i$ -й операции на погрешность финишной операции;  
 $m$  — число звеньев размерной цепи;  
 $\alpha_{\Delta}$ ,  $\alpha_i$  — коэффициенты относительной асимметрии соответственно для замыкающего и составляющего звеньев;

$$\alpha = \frac{\bar{x} - \Delta}{\omega/2},$$

где  $\bar{x}$  — среднее значение погрешности обработки или математическое ожидание);  
 $\lambda_{\Delta}$ ,  $\lambda_i$  — коэффициенты относительной асимметрии;

$$\lambda = \left( \frac{2\sigma}{\omega} \right); \quad \lambda^1 = \lambda^2,$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение.

Для нормального закона распределения  $\alpha = 0$ ,  $\lambda = 0,221$ , для равномерного —  $\alpha = 0$ ,  $\lambda = 0,333$ .

Коэффициенты  $\alpha_{\Delta}$ ,  $\lambda_{\Delta}$  с достаточной для практических целей степенью точности могут быть определены по выражениям

$$\alpha_{\Delta} = \frac{0,59 \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \alpha_i \omega_i}{\sum_{i=1}^{m-1} \left| \xi_i \right| \omega_i};$$

$$\lambda_i = \frac{1}{3} + \frac{0,183}{\sum_{i=1}^{m-1} \left| \xi_i \right| \omega_i} \left( 3 \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i' \omega_i^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \omega_i^2} \right).$$

Поле рассеивания  $\omega$  определяется как разность

$$\omega_i = x_{\max} - x_{\min},$$

где  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  — наибольшее и наименьшее измеренные значения в выборке.

Очевидно, что если определять  $\omega_i$  по выборкам различного объема, то будут получаться различные значения  $\omega_i$ , поэтому для получения сопоставимых оценок целесообразно вычислять  $\omega$  таким образом, чтобы с заданной вероятностью  $P$  обеспечивался выход за пределы поля рассеивания не более  $1 - \beta$  значений случайной величины. Для  $P = 0,95$ ;  $1 - \beta = 0,005$  оценка величины  $\sigma$  должна определяться из выражения

$$s_i \approx s_i 5,62 \left( 1 + \frac{1,17}{\sqrt{N}} + \frac{1,97}{N} \right),$$

где  $\sigma_i$  — среднее квадратическое отклонение, определяемое по выборке объемом  $N$ .

Если в размерной цепи имеются коррелятивно зависимые звенья, то выражение (2.5) в этом случае примет вид

$$\omega_D = \frac{1}{\lambda_D} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i'^2 \omega_i^2 + \sum_{i \neq j}^m \xi_i \xi_j r_{ij} \omega_i \lambda_i \omega_j \lambda_j}. \quad (2.6)$$

## 2.7 Формирование постепенных отказов

В результате изнашивания элементов станков их выходные параметры постепенно ухудшаются. В том числе снижаются точностные параметры, которые определяют так называемую точностную надежность [4].

Свойство надежности технологического процесса принципиально отличается от понятий точности и стабильности [2].

**Точность** — свойство технологического процесса обеспечивать соответствие поля рассеяния значений показателя качества изготовления продукции заданному полю допуска и его расположению. **Стабильность** — свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготавливаемой продукции в заданных пределах в течение некоторого времени. Из этих определений следует, что точность характеризует технологический процесс в некоторый фиксированный момент времени (в статике), а надежность — понятие динамическое, поэтому точность надо рассматривать как составную часть свойства надежности системы. Стабильность характеризует технологический процесс только с позиции сохранения в заданных пределах показателей качества продукции. Таким образом, стабильным является и такой технологический процесс, при котором изготавливается продукция с отклонениями от требований технической документации. При этом для обеспечения стабильности достаточно, чтобы величина брака (даже 100%) была постоянной в течение некоторого времени. Следовательно, технологический процесс может быть стабильным, но иметь низкую надежность. Обратное утверждение неверно, так как надежный технологический процесс должен обладать и высокой стабильностью.

В межналадочный период  $T_0$  в результате процессов средней скорости погрешность обработки возрастает и характеризуется определением  $f(x)$ . При длительной эксплуатации станка возрастают погрешности.

Реализация процесса  $X(t)$  как износ основных деталей станка носит случайный характер (рис. 2.7). Если для точностного параметра  $X$  установлен предельный уровень  $X_{\max}$ , то отказ станка по этому параметру наступает в случайный момент времени  $t$ .

В самом начале работы станка рассеивание режимов работы и начальных параметров определяет случайный характер погрешности обработки и ее распределение  $f_1(x)$ . Случайная реализация  $X(t)$  формирует некоторый закон  $f(t)$  распределения наработки от отказа или срока службы станка.

Вероятность выхода параметра  $X$  за предельный уровень  $X_{\max}$  в случайный момент времени  $t$  представляет собой вероятность  $F(t)$  отказа станка. Основным показателем точностной надежности станка являются вероятность безотказной работы до момента  $t$  и запас надежности  $K_0$  по параметру  $X$ .



$$K_u = \frac{X_{\max}}{X_{\exists}}, \quad (2.8)$$

где  $X_{\exists}$  — экстремальное значение параметра  $X$  к концу межналадочного периода.

Запас надежности по тому или другому выходному параметру может быть определен как для нового станка, так и для станка частично изношенного.

### 3

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Повышение надежности изделий является проблемой, никогда не перестающей быть актуальной, так как она связана как с развитием технического прогресса, так и с экономикой. Именно поэтому вопросы, связанные с прогнозированием и оценкой надежности систем, имеют важное научное и практическое значение. По мнению академика А. И. Берга, надежность закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается в эксплуатации. Это значит, что на всех этапах существования системы вопросы надежности имеют первостепенное значение. Надежность, как более общее свойство, значительно в большей степени, чем такие характеристики как прочность, жесткость, износостойкость, виброустойчивость, теплостойкость и т. п., зависит от стадий конструирования, изготовления и эксплуатации, поэтому не случайно в *ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Термины и определения* понятие «отказ» дифференцируется на отказы конструкционный, производственный и эксплуатационный. С учетом классификации отказов, содержащейся в ГОСТ 27.002-89, структура надежности технологических систем будет иметь вид, показанный на рисунке 3.1. В соответствии с этими отказами дифференцированно должна определяться и надежность системы. Так, П. И. Буловский рассматривает «три фазы надежности» [7]:

1) *теоретическая надежность*, обусловленная надежностью конструкции  $P_k(t)$ , схемы  $P_{cx}(t)$  и элементов  $P_{эл}(t)$ :

$$P_{\text{теор}}(t) = P_k(t) \text{ I } P_{cx}(t) \text{ I } P_{\text{пр}}(t) \text{ I } P_{\text{эл}}(t); \quad (3.1)$$

2) *техническая надежность*, определяемая отказами, связанными с изготовлением системы:

$$P_{\text{техн}}(t) = P_{\text{теор}}(t) \mathbf{I} P_{\text{изг}}(t); \quad (3.2)$$

3) *эксплуатационная надежность*, определяемая эксплуатационными отказами:

$$P_{\text{эксп}}(t) = P_{\text{техн}}(t) \mathbf{I} P_{\text{пр}}(t). \quad (3.3)$$

Очевидно, что

$$P_{\text{эксп}}(t) = P_{\text{пр}}(t) \mathbf{I} P_{\text{изг}}(t) \mathbf{I} P_{\text{к}}(t) \mathbf{I} P_{\text{сх}}(t) \mathbf{I} P_{\text{эл}}(t). \quad (3.4)$$

В соответствии со структурой надежности (рис. 3.1) прогнозирование теоретической надежности на стадии проектирования связано с расчетом надежности конструкции, схемной (структурной) и параметрической надежности, а также надежности элементов.

Несмотря на то, что надежность конструкции выделена отдельной составляющей теоретической надежности, методы ее оценки на стадии проектирования разработаны еще не достаточно полно. В то же время,

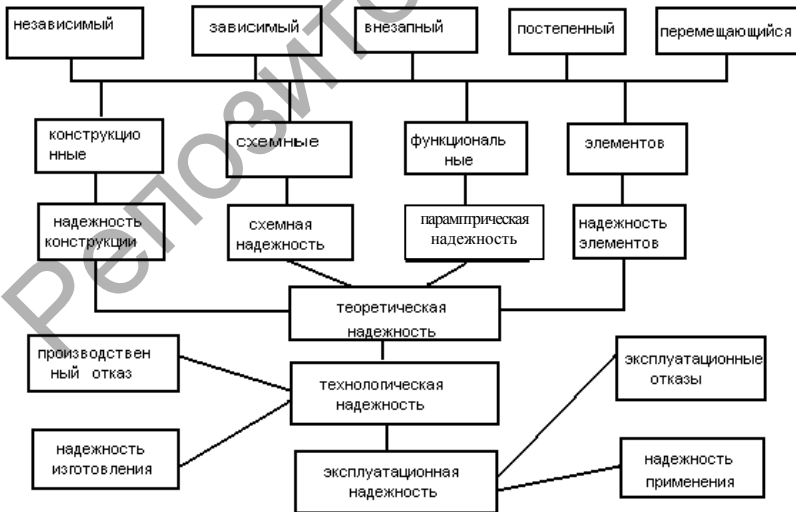


Рисунок 3.1 — Структура надежности технических систем

как свидетельствуют данные некоторых авторов, именно на стадию конструкторской разработки падает наибольший процент ошибок, приводящих к последующим отказам. Так, 60—90% разработок, проводимых в американских промышленных концернах, оказываются безрезультатными, причем 80% таких разработок обнаруживается лишь после выпуска изделий на рынок сбыта [8].

Анализ повреждений большого количества приборов выявил следующее соотношение их появления, выраженное в процентах:

- а) ошибки в проектировании, выборе материалов и правильное применение деталей — 40;
- б) неправильная эксплуатация — 30;
- в) ошибки производства, недостаточный технический контроль, дефекты материала — 20;
- г) старение материала и другие дефекты — 10.

Отечественные исследования в области электронных приборов показали, что 50—60% отказов обусловлено ошибками при конструировании [9].

Приведенные данные подтверждают то, что оценку работоспособности технических систем надо начинать с момента ее расчета и проектирования.

Увеличение числа и масштабов последствий техногенных аварий и катастроф обусловлено не только ростом сложности производства с применением новых технологий, требующих высоких концентраций энергии, опасных для жизни человека веществ и оказывающих заметное воздействие на компоненты окружающей среды, но и крупными структурными изменениями в экономике страны, приведшими к сбою в сфере финансирования, высоким и прогрессирующим уровнем износа и старения основных фондов (например, в ряде производств химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности износ составляет 80—100%), падением технологической и производственной дисциплины и снижением квалификации персонала, переносов сроков ремонта и замены оборудования, упрощением регламентного обслуживания [54].

В *ГОСТ 27.301-83 Надежность в технике. Прогнозирование надежности изделий при проектировании. Общие требования при прогнозировании надежности конструкции* рекомендуется проводить расчеты всех деталей конструкций с применением теории вероятности, математической статистики, функционального анализа в совокупности

с методами теории прочности и механики разрушения, теории трения и износа. При невозможности проведения расчетов из-за недостатка информации, а также для ответственных деталей и сборочных единиц рекомендуется использовать экспертные методы.

Однако если воспользоваться данными рекомендациями, то в первом случае получают оценку надежности элементов, т. е. решается другая задача (см. рис. 3.1). При использовании экспертных методов прогнозирование получается неточным, при этом необходимо провести большую организационную и техническую работу по подготовке и проведению экспертного опроса, отвлечь группу квалифицированных специалистов на определенное время для проведения экспертного опроса. Необходимо отметить, что в настоящее время проектирование изделия, как правило, осуществляется не одиночками, а группами конструкторов, поэтому можно считать, что уже при проектировании конструкция практически проходит экспертизу квалифицированными специалистами, однако не целевого характера, т. е. без постановки задачи получения показателей надежности конструкции. Именно поэтому экспертный опрос вновь спроектированной системы при огромных затратах на его проведение вряд ли можно считать эффективным методом получения показателей надежности конструкции.

Элементы конструкции К. Н. Воинов предлагает распределять на две группы: наиболее ответственные и прочие, выход из строя которых может ухудшить работу системы, но не привести ее к отказу [10]. При этом считается, что все элементы, входящие в каждую группу, равнонадежны и закон распределения их отказов — экспоненциальный.

Для определения вероятности безотказной работы системы задаются значениями интенсивности отказов по обеим группам элементов. Учет особенностей конструктивного исполнения, ремонта и эксплуатации производится путем умножения вероятности безотказности работы системы на соответствующие коэффициенты

$$P_c(t) = KP_{co}(t), \quad (3.5)$$

где  $P_{co}(t)$  — вероятность безотказной работы системы, установленная по значениям интенсивностей отказов.

При этом

$$K = K_1 K_2 K_3,$$

где  $K_1$  — конструкционный коэффициент;  
 $K_2$  — коэффициент ремонтной сложности;  
 $K_3$  — эксплуатационный коэффициент.

В отличие от изложенного метода учет особенностей реальных элементов по сравнению со стандартными, для которых взяты базовые значения интенсивностей отказов, производится путем умножения базовой интенсивности отказов на соответствующие коэффициенты [11]

$$\lambda_i = \lambda_{\text{б}} K_{\text{к}} K_{\text{э}} K_{\text{у}} K_{\text{с}}, \quad (3.6)$$

где  $\lambda_{\text{б}}$  — базовая интенсивность отказов элемента;  
 $K_{\text{к}}$  — коэффициент, учитывающий качество изготовления;  
 $K_{\text{э}}$  — коэффициент, учитывающий условия эксплуатации;  
 $K_{\text{у}}$  — коэффициент, учитывающий конструкцию;  
 $K_{\text{с}}$  — коэффициент, учитывающий сложность элемента.

Аналогичный подход к оценке надежности конструкции системы принят и в ряде других работ. Однако приходится констатировать, что по механическим элементам еще не собран достаточный для такого учета статистический материал. Хотя К. Н. Воинов предполагает, что в перспективе конструкторские и технологические бюро будут оснащены специальной справочной информационной установкой, с помощью которой проектировщик может получить ответы на целый ряд вопросов, например, как происходит износ, старение и коррозия элементов механических систем (аналогов (или прототипов) в эксплуатации) и как влияют температурные режимы и распределения нагрузок на усталостные разрушения, а способы обработки, ремонта и крепежа — на гамма-процентный ресурс [10]. Однако вряд ли в ближайшее время может быть решена эта задача.

В какой-то степени эта задача может быть решена только для стандартных деталей. Технические системы большей частью состоят из оригинальных деталей, постепенно совершенствуются и обновляются. Например, вся выпускаемая продукция машиностроения в СССР была обновлена на 50%, за 1973—1975 гг. — на 22,5%. За период с 1958 по 1973 гг. в автомобильной промышленности США темп обновления увеличился с 2,5 до 7,5%, в авиакосмической — с 8,8 до 13%, в электротехническом и общем машиностроении — с 3 до 5% в год [9].

Обновление сопровождается, как правило, усложнением изделий. Если в период создания первых металлорежущих станков на заводе Дж. Уитворта [12] конструктор мог изобразить свою идею, эскизируя конфигурацию деталей мелом на полу, то в современных условиях объектом разработки являются сложнейшие системы, которые могут быть изготовлены только на основе комплекта конструкторской документации. Анализируя изложенные методы, можно увидеть, что для оценки надежности конструкции необходимы данные об интенсивности отказов элементов, а также принятие условия равнонадежности элементов. Важно также отметить и то, что для оценки надежности конструкции системы практически не используется конструкторская документация. Для вновь проектируемых систем информация об интенсивности отказов элементов, как правило, отсутствует. Весьма спорно применение формул для определения коэффициентов, учитывающих особенности новой конструкции, если еще не существует аналогов. Кроме того, допущение о равнонадежности элементов не совсем правильно, так как механическая система выходит из строя, как правило, из-за отказа одного-двух наиболее слабых элементов, в то время как остальные элементы могут еще длительное время функционировать.

Надежность конструкции рекомендуется определять по результатам испытаний при конструкторской отработке системы с учетом изменений, вносимых в конструкцию, т. е. информация для расчета надежности конструкции должна быть получена в результате испытаний [13].

Таким образом, заканчивая краткий анализ методов оценки надежности конструкции системы, можно сделать вывод о том, что прогноз надежности конструкции системы существующими методами может быть сделан лишь в том случае, если имеется информация о надежности системы.

Значительно лучше дело обстоит с прогнозированием схемной или структурной надежности системы. Данный метод заключается в том, что определение вероятности безотказной работы системы производится по ее структурной схеме, состоящей из суммы соединенных последовательно или параллельно элементов, являющихся независимыми и одноотказными, при известных значениях вероятности безотказной работы или интенсивности отказов каждого  $i$ -го элемента. Основой структурных схем являются условные виды

последовательных и параллельных соединений элементов, соответствующих функционированию системы.

**Последовательным соединением** называется совокупность элементов, для которой необходимым и достаточным условием нарушения работоспособности является отказ хотя бы одного элемента, входящего в данную совокупность.

**Параллельным соединением** называется совокупность элементов, работоспособность которой нарушается только при условии отказа всех элементов, входящих в данную совокупность.

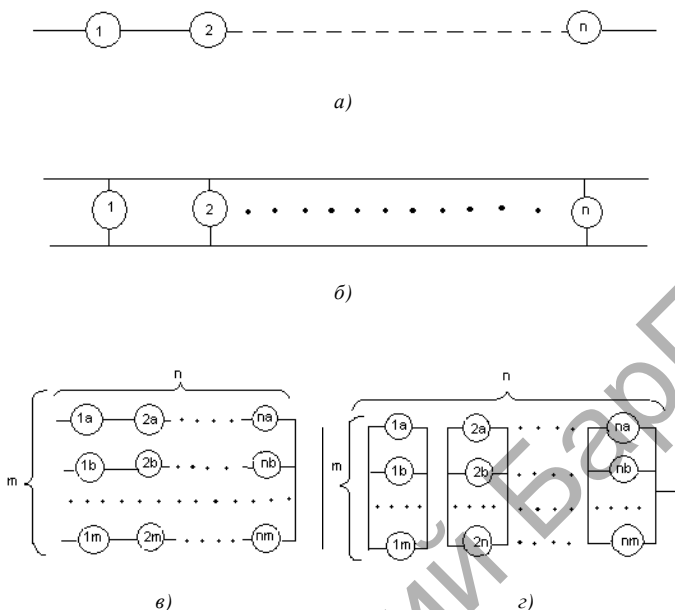
Из приведенных определений следует, что тип соединения определяется видом и характером отказов элементов системы.

Параллельное соединение элементов применяют в качестве резервирования в различных системах управления, включающих сложные радиоэлектронные устройства. В практике проектирования сложных технических систем часто используют схемы с параллельным соединением элементов (рис. 3.2.), которые построены таким образом, что отказ системы возможен лишь в случае, когда отказывают все ее элементы, т. е. система исправна, если исправен хотя бы один ее элемент. Такое соединение часто называют резервированием, которое в большинстве случаев оправдывает себя, несмотря на увеличение стоимости. Наиболее выгодным является резервирование отдельных элементов, которые непосредственно влияют на выполнение основной работы. При конструировании технических систем в зависимости от выполняемой системой задачи применяют горячее или холодное резервирование.

*Горячее резервирование* используется тогда, когда не допускается перерыв в работе на переключение отказавшего элемента на резервный с целью выполнения задачи в установленное время. Чаще всего горячему резервированию подвергают отдельные элементы. Используют горячее резервирование элементов и подсистем, например, источников питания (аккумуляторные батареи дублируются генератором и т. п.).

*Холодное резервирование* применяется в тех случаях, когда необходимо увеличить ресурсах работы элемента, поэтому предусматривают время на переключение отказавшего элемента на резервный.

Существуют технические системы с частично параллельным резервированием, т. е. системы, которые оказываются работоспособными даже в случае отказа нескольких элементов.



*a* — последовательное соединение; *б* — параллельное соединение;  
*в* — последовательно-параллельное соединение;  
*г* — последовательно-параллельное из параллельных блоков

Рисунок 3.2 — Схемы соединений элементов в технических системах

Для анализа схемной надежности систем применяется булева алгебра [14]. Переменные  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , которые могут принимать лишь два значения 0 и 1, называются **булевыми переменными**. Из булевых переменных можно образовать  $2^n$ , не совпадающих между собой сочетаний вида  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , например,  $(0, 0, \dots, 0)$ ,  $(0, 0, \dots, 1) \dots (1, 1, \dots, 1)$ , которые представляют собой вершины  $n$ -мерного единичного куба в евклидовом пространстве, имеющего одну из вершин в начале координат.

Функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  любого конечного числа булевых переменных называются булевыми. Полагаем, что элементы, составляющие систему, могут находиться лишь в двух состояниях: работоспособном или неработоспособном.

Система может состоять из  $n$  элементов. Состояние  $i$ -го элемента обозначим булевой переменной  $x_i$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й элемент функционирует,} \\ i = 1, \dots, n, \\ 0, & \text{если } i\text{-й элемент отказал.} \end{cases} \quad (3.7)$$

Состояние системы есть функция булевых переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$

$$S(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 1, & \text{если система функционирует,} \\ 0, & \text{если система отказала.} \end{cases} \quad (3.8)$$

Таким образом, система функционирует, если элементы  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  работоспособны, т. е.

$$S(1, 1, \dots, 1) = 1. \quad (3.9)$$

Система отказывает, если элементы  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  неработоспособны, т. е.

$$S(0, 0, \dots, 0) = 0. \quad (3.10)$$

Булева алгебра характеризуется двумя бинарными операциями, обозначаемыми как логическое сложение и умножение. Сложение (называемое в математической логике дизъюнкцией [15], или операцией «или») обозначается  $\cup$ . Умножение (называемое конъюнкцией, или операцией «и») обозначается  $\cap$ . Дизъюнкция и конъюнкция переменных, принимающих два значения 0 и 1, могут быть записаны следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I} x_i &= \prod_{i=1}^n x_i = \min(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \mathbf{U} x_i &= 1 - \prod_{i=1}^n x_i = \max(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Используя операции дизъюнкции и конъюнкции между переменными, можно вычислить функцию системы  $S(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . При этом рассматривают три случая:

1. Система функционирует лишь тогда, когда все элементы работоспособны. Это соответствует последовательному соединению элементов (рис. 3.2, а).

Пусть событие  $x_i$  означает, что  $i$ -й элемент работоспособен, а  $\bar{x}_i$  — обратное событие. Тогда система, состоящая из  $n$  последовательно соединенных элементов, работоспособна, если  $x_1, x_2, \dots, x_n$  работоспособны. В этом случае функция системы может быть получена конъюнкцией переменных  $x$ :

$$S(x_i) = x_1 \mathbf{I} x_2 \mathbf{I} x_3 \dots \mathbf{I} x_n = \mathbf{I}_{i=1}^n x_i = \prod_{i=1}^n x_i. \quad (3.12)$$

Если перейти к показателям надежности, т. е. вместо переменных  $x_i$  подставить вероятности безотказной работы элементов  $p_i(t)$ , то вероятность безотказной работы системы будет равна

$$P_c(t) = p_1(t) \mathbf{I} p_2(t) \mathbf{I} p_3(t) \dots \mathbf{I} p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t); \quad (3.13)$$

вероятность отказа —

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)). \quad (3.14)$$

Поскольку для элементов всегда  $q_i(t) \leq 1$ , то распределение времени безотказной работы в разные периоды подчиняется различным законам.

Внезапные отказы в период приработки описываются чаще всего гамма-распределением или распределением Вейбулла с параметром  $m < 1$ , в период старения и повышенного износа — распределением Релея или усеченным нормальным распределением [16]. В период

нормальной работы характерно постоянство интенсивности отказов, следовательно, справедлив для элементов экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы

$$p_i(t) = \exp\left\{-\lambda_i(t)dt\right\}, \quad (3.15)$$

и для системы

$$P_c(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t)dt\right\} = e^{-\lambda_c t}, \quad (3.16)$$

$$P_c(t) \leq p_i(t), \quad Q_i(t) \geq q_i(t), \quad (3.17)$$

( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ).

В формулах (3.15) и (3.19)  $\lambda(t)$  — интенсивность отказов  $i$ -го элемента,  $\lambda_c$  — интенсивность отказов системы.

Интенсивность отказов элементов равна

$$\lambda_i(t) = \frac{f_i(t)}{p_i(t)} = -\frac{1}{p_i(t)} \frac{d}{dt} p_i(t) = \frac{1}{1-F_i(t)} \frac{d}{dt} F_i(t), \quad (3.18)$$

где  $f_i(t)$  — плотность распределения наработки  $i$ -го элемента до отказа.

Интенсивность отказов системы равна

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t), \quad (3.19)$$

а при равнонадежных элементах

$$\lambda_c = n\lambda(t). \quad (3.20)$$

Средний ресурс системы равен

$$\bar{t}_c = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_c t} dt = \frac{1}{\lambda_c}. \quad (3.21)$$

Данная модель позволит нормировать надежность элементов при условии их равнонадежности, если задана надежность системы. Вероятность безотказной работы элемента определяется по формуле

$$p_i(t) = \sqrt[n]{P_c(t)}. \quad (3.22)$$

2. Система функционирует, если функционирует хотя бы один из ее элементов. Это соответствует параллельному соединению элементов. Параллельное соединение называют еще избыточной или резервированной структурой, поскольку такая система содержит элементов больше, чем это необходимо для ее нормального функционирования.

При отказе одного или нескольких элементов функция системы выполняется оставшимися в работе элементами. Отказ параллельного соединения предполагает, что все  $m$  элементов не работоспособны, тогда функция системы выражается конъюнкцией переменных  $x_j$

$$S(\bar{x}_j) = \bar{x}_1 \mathbf{I} \bar{x}_2 \mathbf{I} \bar{x}_3 \dots \mathbf{I} \bar{x}_m = \prod_{j=1}^m \bar{x}_j. \quad (3.23)$$

Если вместо отрицания переменной  $x_j$  подставить обратное значение  $\bar{x}_j = 1 - x_j$ , то

$$S(\bar{x}_j) = (1 - x_1) \mathbf{I} (1 - x_2) \dots \mathbf{I} (1 - x_m) = 1 - \prod_{j=1}^m x_j = 1 - \prod_{j=1}^m x_j. \quad (3.24)$$

Заменив переменные  $\bar{x}_j$  вероятностями отказов элементов, а  $x_j$  — вероятностями безотказной работы, получим вероятность отказов системы

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^m q_i(t) \quad (3.25)$$

и вероятность безотказной работы системы

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^m q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^m \{1 - p_j(t)\}. \quad (3.26)$$

Поскольку для элементов всегда  $q_j(t) > 1$ , то

$$Q_c^m(t) \leq q_j(t), \quad P_c^m \geq p_j(t), \quad (3.27)$$

$$j = 1, 2, \dots, m.$$

Вероятность безотказной работы системы определяется по формулам:

а) при равнонадежных элементах  $p_1(t) = p_2(t) = \dots = p_m(t)$

$$P_c(t) = 1 - [1 - p_i(t)]^m; \quad (3.28)$$

б) если время безотказной работы элементов подчиняется экспоненциальному закону, то

$$P_c(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right) \left(1 - e^{-\lambda_2 t}\right) \dots \left(1 - e^{-\lambda_m t}\right); \quad (3.29)$$

в) при равнонадежных элементах  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_m$

$$P_c(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^m. \quad (3.30)$$

Средний ресурс системы [17]

$$\bar{t}_c = \int_0^{\infty} 1 - \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^m dt. \quad (3.31)$$

Используем метод, предложенный И. Д. Федоровым [18]. Обозначим  $1 - e^{-\lambda t} = z$ , тогда

$$dt = \frac{dz}{\lambda(1-z)} \quad \text{и} \quad \bar{t}_c = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{1-z^m}{1-z} dz = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 (1+z+z^2+\dots+z^{m-1}) dz.$$

Вводится обозначение  $\sum_{j=0}^{m-1} z^j = 1+z+z^2+\dots+z^{m-1}$ , и тогда

$$\bar{t}_c = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \sum_{j=0}^{m-1} z^j dz = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=0}^{m-1} \int_0^1 z^j dz = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{1}{j+1} z^{j+1} \Big|_0^1.$$

Окончательно

$$\bar{t}_c = \frac{1}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{m} \right) \quad (3.32)$$

Если элементы равнонадежны, то при заданной надежности системы  $P_c(t)$  необходимая надежность элементов составит

$$p_j(t) = 1 - \sqrt{1 - P_c(t)}. \quad (3.33)$$

3. При смешанном соединении элементов системы аналитическое выражение надежности функции системы получается путем поэтапного объединения элементов по формулам для последовательного и параллельного соединения элементов. Например, для схем (см. рис. 3.2, б) функция надежности системы имеет вид

$$S(x_i) = \left( 1 - x_1^1 x_2^1 \dots x_n^1 \right) \left( 1 - x_1^2 x_2^2 \dots x_n^2 \right) \dots \left( 1 - x_1^m x_2^m \dots x_n^m \right) = \prod_{i=1}^m \left( 1 - x_1^i x_2^i \dots x_n^i \right). \quad (3.34)$$

Для системы (см. рис. 3.2, в) функция надежности системы следующая:

$$S(x_i) = \left\{ 1 - \left( 1 - x_1^1 \right) \left( 1 - x_2^1 \right) \dots \left( 1 - x_n^1 \right) \right\} \times \\ \times \left\{ 1 - \left( 1 - x_1^2 \right) \left( 1 - x_2^2 \right) \dots \left( 1 - x_n^2 \right) \right\} \times \dots \\ \dots \times \left\{ 1 - \left( 1 - x_1^m \right) \left( 1 - x_2^m \right) \dots \left( 1 - x_n^m \right) \right\}.$$

Обозначим  $z^i = \left( 1 - x_1^i \right) \left( 1 - x_2^i \right) \dots \left( 1 - x_n^i \right)$ , тогда

$$S(x) = \prod_{i=1}^m \left( 1 - z^i \right). \quad (3.35)$$

При более сложной структуре системы, состоящей из ряда цепей и блоков элементов, имеющих последовательное и параллельное соединение, применяют методы «минимальных путей» и «минимальных сечений» [19—21].

Необходимо отметить, что прогнозирование схемной надежности возможно осуществить для систем с любой сложной структурой, но непременным условием при этом является наличие информации о надежности элементов (вероятности безотказной работы или интенсивности отказов). Серьезным недостатком рассмотренных методов расчета схемной надежности систем является допущение о жесткой фиксации значений вероятности безотказной работы элементов без учета динамики изменения процессов во времени [14].

В работе И. А. Ушакова предлагается методика определения показателей надежности систем с учетом «старения» элементов путем использования «стареющих» распределений [20].

Вероятность безотказной работы системы при последовательном соединении определяется по зависимости

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) > \begin{cases} e^{-t \sum_{i=1}^n 1/\bar{t}} & \text{для } t_i \leq t^* \\ 0 & \text{для } t_i > t^* \end{cases}, \quad (3.36)$$

где  $t^* = \min t_i$ .

Вероятность отказа системы при параллельном соединении определяется из выражения

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^m q_j(t) \leq \begin{cases} \prod_{j=1}^m \left( 1 - e^{-t_j / \bar{t}} \right) & \text{для } t_j \leq t^* \\ 1 & \text{для } t_j > t^* \end{cases}. \quad (3.37)$$

Соответственно вероятность безотказной работы

$$P_c(t) \geq \begin{cases} \frac{1 - \prod_{j=1}^m \left( 1 - e^{-t_j / \bar{t}} \right)}{1} & \text{для } t_j \leq t^* \\ 1 & \text{для } t_j > t^* \end{cases}. \quad (3.38)$$

Среднее время безотказной работы системы при последовательном соединении элементов, каждый из которых имеет ВФИ-распределение (распределение с возрастающей функцией интенсивности отказов)

$$\left( \sum_{i=1}^n t_i^{-1} \right)^{-1} \leq \bar{t} \leq \min t_i, \quad 1 \leq i \leq n. \quad (3.39)$$

Среднее время безопасной работы системы, состоящей из  $m$  параллельно соединенных элементов, имеющих ВФИ-распределение

$$\max t_j \leq t_{\Sigma} \leq \sum_{j=1}^n t_j - \sum_{1 \leq j \leq m} (t_j^{-1} + \bar{t}^{-1}) + (-1)^{m+1} \left( \sum_{j=1}^m \bar{t}^{-1} \right)^{-1}. \quad (3.40)$$

Рассмотренные методы прогнозирования схемной надежности систем профессор В. В. Болотин [22] относит к «системной надежности», применяемой для систем, условия эксплуатации которых «относительно однородны, стационарны и поддаются воспроизведению в условиях стендовых испытаний». Кроме того, существенным признаком таких систем является то, что они состоят из большого количества типовых элементов, для которых сравнительно легко можно получить показатели надежности путем испытаний.

Отличительной чертой технических систем является более сложный характер взаимодействия между элементами внутри системы, зависимость от окружающей среды, характера и интенсивности эксплуатации. Для оценки надежности системы в целом «недостаточно знать только показатели отдельных элементов» [22]. Для прогнозирования технических систем, по мнению профессора В. В. Болотина, необходимо применять расчетно-теоретический метод, основанный на статистических данных относительно свойств материалов элементов, нагрузок и воздействий. Такой метод может быть основан на теории случайных процессов [22].

Состояние системы в каждый момент  $t$  описывают с помощью вектора  $u$ -элемента пространства состояний  $U$ . Каждой реализации процесса  $u(t)$  соответствует некоторая траектория в пространстве состояний  $U$ . Внешние воздействия характеризуются векторным процессом  $q(t)$ . Уравнение состояния объекта записывается в виде

$$u = H[q], \quad (3.41)$$

где  $H$  — некоторый оператор, реализующий выбранную расчетную схему и метод расчета.

Совокупность параметров, характеризующих условия эксплуатации, эффективность, экономичность и безопасность системы, образует вектор качества  $v$  в пространстве качества  $V$ . В общем случае связь между вектором состояний и вектором качества имеет вид

$$v = M[u], \quad (3.42)$$

где оператор  $M$  считается заданным.

Допустимая область качества задается соотношением

$$\Omega = \{r, q: r - q > 0\}. \quad (3.43)$$

Совокупность параметров, измеряемых в каждый момент времени, образует диагностический вектор или вектор признаков  $w$ . Изменение его во времени описывается векторным процессом  $w(t)$  в диагностическом пространстве  $W$ .

Пространства  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  и  $W$  — трехмерные. Если могут быть точно проведены измерения  $w(t)$ , то в этом случае, в связи с тем, что отображения пространств  $V$  и  $W$  — взаимно однозначные, целесообразно отобразить допустимую область  $\Omega$  на  $W$  и описывать приближение объекта к состоянию отказа, используя процесс  $w(t)$ . Выходы реализаций случайных процессов за пределы допустимых областей называют выбросами, поэтому задача оценки надежности может быть сведена к выбору расчетных схем, математических моделей для описания случайных свойств нагрузок, воздействий, материалов, а также выбору пространства качества и допустимой области в этом пространстве.

Так, если  $v(t)$  — траектория качества в пространстве  $V$ , то функция надежности  $P(t)$  выразится в виде вероятности пребывания вектора  $v$  в допустимой области на определенном отрезке времени  $[t_0, t]$ :

$$P(t) = P\{v(\tau) \in W; \tau \in [t_0, t]\}. \quad (3.44)$$

Довольно близкими к методу, разработанному профессором В. В. Болотиним и другими авторами [23], являются методы прогнозирования параметрической надежности систем, в которых отказ трактуется как выход параметров системы, обусловленных протеканием различных деградационных процессов под действием окружающей среды и режимов функционирования, за некоторые установленные пределы, характеризующие работоспособность системы. Для прогнозирования параметрической надежности используются данные о физических свойствах материалов и влиянии на них воздействующих факторов в сочетании с вероятностными

и статистическими методами. Методы прогнозирования параметрической надежности могут быть разделены на две большие группы: аналитические и экспериментальные [7]. К аналитическим методам относятся матричные, методы графов, дифференциальных уравнений, логико-вероятностные. Экспериментальные методы (или методы моделирования) представляют собой методы вычислительного и физического моделирования. К первым относятся методы статистических испытаний (метод Монте-Карло) и логико-статистический, ко вторым — методы граничных, матричных и динамических испытаний. Процесс определения зависимостей изменения главных параметров функционирования систем является довольно сложной задачей и в настоящее время находится в стадии развития [22]. И, наконец, рассмотрим состояние вопросов прогнозирования показателей надежности элементов, поскольку наличие информации о надежности элементов позволяет, как было показано выше, прогнозировать надежность системы в целом. Систематизация данных по отказам технических систем показывает, что основными причинами отказов элементов являются износы, усталостные и прочностные поломки.

Классификация моделей для расчета показателей надежности механических систем, выполненная в работе В. С. Лукинского, выявила 15 различных моделей расчета [24].

Основной отличительной особенностью этих моделей является форма представления в расчетах показателей надежности нагрузки, предельных состояний деталей. Случайные нагрузки могут быть описаны функциями распределения  $F(x)$  или плотностью распределения  $f(x)$ ; в расчетах на статическую прочность используется также распределение экстремальных значений нагрузок; в расчетах на усталость нагрузки описываются корреляционными функциями, а также функциями распределения выбросов  $F_v(S)$ . Нестационарность случайных процессов нагружения оценивается в общем случае математическим ожиданием, дисперсией и частотой. Законами распределения случайных функций обычно служат законы Вейбулла, Релея, гамма, логарифмически нормальный, экспоненциальный без параметра сдвига и с наличием параметра сдвига.

Проектная экспертиза заключается в проверке обоснованности конструкторско-технологических решений по критериям прочности, ресурса, надежности, живучести и приемлемого риска. Причинно-следственный комплекс аварий и катастроф обусловлен большим

числом факторов случайной природы, поэтому они рассматриваются как вероятностные события. Нетривиальность операции оценки вероятности редких событий наряду со сложностью структуры систем, многообразием причин аварий и их последствий делают задачу оценки вероятности аварий и катастроф уникальной, характерной для данной технической системы. Такие подходы требуют обширной статистической информации и понимания структуры причинно-следственных связей, формирующих аварию или катастрофу. Как следствие ни один из указанных методов не дает исчерпывающих оценок вероятности аварий и катастроф.

Следует признать, что расчетно-теоретические экспертизы имеют важное практическое значение для обеспечения надежности и совершенствования конструктивно-технологических решений только на стадии вариантного проектирования и не могут гарантировать безопасность технических систем при их эксплуатации. Главным стратегическим направлением в обеспечении безопасности технических систем должно являться развитие технической диагностики с ориентацией на стационарные системы контроля, достаточно простые и надежные в работе.

Анализ расчетных моделей возможных сочетаний нагрузок и предельных состояний показывает, что для идентификации этих моделей необходимы данные по параметрам и функции распределения случайного процесса нагружения, а также данные о предельных состояниях элементов [24]. Можно отметить также и то, что эти модели не учитывают конструктивных особенностей элементов, структурные и функциональные связи элементов с другими, что, естественно, снижает достоверность прогнозирования показателей надежности элементов. В то же время только аналитическими зависимостями учесть влияние этих факторов на надежность элементов весьма трудно, поэтому единственно достоверным источником информации о надежности элементов системы являются их испытания в условиях, приближенных к эксплуатационным, либо наблюдения за состоянием элементов в процессе эксплуатации.

Приведенный выше краткий обзор методов прогнозирования теоретической надежности систем показывает, что наиболее полно и на уровне, приемлемом для конкретных инженерных расчетов, разработан метод оценки схемной надежности систем, при этом подразумевается, что существует информация о надежности элементов.

Анализ эксплуатационных наблюдений за состоянием различных машин и механизмов свидетельствует о том, что их отказы обычно наступают при отказе одного или нескольких элементов, которые оказались наиболее «слабыми» из всей совокупности элементов, составляющих систему.

У восстанавливаемых систем «слабые» элементы могут быть отремонтированы, заменены новыми и система вновь начинает функционировать. У невосстанавливаемых систем отказ «слабого» элемента приводит к отказу всей системы. Так, замена зубчатой передачи в коробке передач трактора вместо вышедшей из строя из-за износа зубьев колес приведет лишь к некоторой остановке трактора, связанной с заменой передачи, а вот выход любой зубчатой передачи привода поворотного устройства антенного блока летательного аппарата приведет к тому, что перестает существовать весь летательный аппарат в целом. Концепция надежности таких систем может заключаться в установлении «слабых» элементов системы, определении показателей их надежности, которые и определяют надежность всей системы. Подобная модель сравнивается с цепью, состоящей из  $n$  звеньев, которая разрушается в том случае, если приложена нагрузка, превышающая прочность какого-либо одного звена [25].

В сложной системе, состоящей из нескольких подсистем, может быть несколько «слабых» элементов, расположенных в различных подсистемах. В этом случае вероятность безотказной работы системы определяется как при последовательном соединении элементов:

$$P_m(t) = \prod_{j=1}^m p(t)_{c.э.j}, \quad (4.1)$$

где  $p(t)_{c.э.j}$  — вероятность безотказной работы  $j$ -го «слабого» элемента из  $m$  элементов системы.

Это соответствует модели, состоящей из  $m$  последовательно соединенных элементов, имеющих случайные значения параметров надежности. Тогда

$$P_m(t) = \min(t)_{c.э.j}. \quad (4.2)$$

Таким образом, задача определения надежности системы сводится к оценке надежности наименее ненадежного элемента системы, так называемого «слабого» элемента, который обладает худшими характеристиками работоспособности по сравнению с другими и которые находятся в наиболее тяжелых условиях функционирования. Характеристика работоспособности элемента — обобщенная характеристика, зависящая от множества факторов, определяющих состояние элемента (нагруженность, скорость и точность перемещения, воздействие окружающей среды, внешние и внутренние свойства элемента, характеристика материала, связь с другими элементами и т. п.).

Если система имеет  $m$  слабых элементов, то это равносильно выбору  $m$  случайных значений из совокупности с распределением  $f_x(x)$ . Пусть  $x_m$  — случайная величина, обозначающая характеристику работоспособности системы, состоящей из  $m$  элементов, тогда

$$x_m = \min(x_j), \quad (4.3)$$

где  $x_j$  — переменная, обозначающая характеристику работоспособности  $j$ -го элемента,  $1 \leq j \leq m$ .

Приняв за нормированное значение характеристики работоспособности  $x_n$  элемента, обеспечивающее заданную надежность системы, запишем выражение для вероятности безотказной работы системы

$$P_c(x) = P\{x_{\min} < x_n\}, \quad (4.4)$$

где  $x_{\min}$  — характеристика работоспособности слабого элемента системы.

Если известно значение вероятности безотказной работы  $p_{\min}(t)$  или интенсивность отказов  $\lambda_{\max}(t)$  слабого элемента и его характеристика работоспособности  $x_{\min}$ , а также характеристики работоспособности остальных функционально значимых элементов  $x_j$ , то из пропорций

$$\frac{x_j}{x_{\min}} \cong \frac{p_j(t)}{p_{\min}(t)}, \quad \frac{x_j}{x_{\min}} \cong \frac{\lambda_{\max}(t)}{\lambda_j(t)} \quad (4.5)$$

можно определить вероятность безотказной работы или интенсивность отказов функционально значимого  $j$ -го элемента

$$p_j(t) = P_{\min}(t) \frac{x_j}{x_{\min}}, \quad \lambda_j(t) = \lambda_{\max}(t) \frac{x_{\min}}{x_j}. \quad (4.6)$$

Значение характеристики работоспособности слабого элемента, а также некоторых других функционально значимых элементов может быть меньше нормированного значения характеристики работоспособности элемента. Если  $x_{\min} < x_n$ , то  $P_c(x) < 1$ . При  $x_{\min} > x_n$  вероятность безотказной работы системы  $P_c(x) = 1$ . При значениях  $x_{\min} < x_n$  по формуле (4.4) определяются значения вероятностей безотказной работы или интенсивностей отказов для остальных  $m$  функционально значимых элементов системы. У элементов, не попавших в группу функционально значимых, значения характеристик работоспособности  $x_i > x_n$ , следовательно, и вероятность безотказной работы  $p_i(t) = 1$  и интенсивность отказов  $\lambda_i(t) > \lambda_{\min}(t)$ .

При известных значениях вероятностей безотказной работы или интенсивностей отказов элементов надежность системы определяется в зависимости от структуры системы по формулам (3.1)—(3.4). Для определения функционально значимых и слабых элементов используется *системный подход* — методология исследования объектов как систем, элементы которых связаны причинно-следственными связями [26].

Другими словами, **системный подход** — направление в исследовательской деятельности, заключающееся в представлении объекта в виде иерархической системы, на которую воздействует множество факторов самого различного характера, позволяющее выделить из них наиболее существенные с точки зрения общесистемных целей и критериев, найти пути и методы управления ими. Стремление найти новые пути в познании сложных объектов привело к созданию общей теории систем, впервые предложенной Л. фон Бергаланфи [27].

Вопросам изучения поведения отдельных частей системы, синтеза этих частей в сложные системы и анализа различных связей между ними посвящен ряд работ Месаровича, Эшби, Шеннона, Н. Т. Бусленко, В. П. Садовского и других отечественных и зарубежных ученых.

Системный подход исходит из известного принципа взаимосвязи и взаимообусловленности явлений, требуя рассмотрения изучаемого

объекта не только как самостоятельной системы, но и как части некоторой общей системы. Системный подход требует прослеживания как можно большего числа связей для последующего их ранжирования, отбора существенных факторов и их оценки.

Основными принципами системного подхода являются категории целостности, связанности и организованности.

Принцип целостности предполагает исследование некоторого конкретного объекта, частично обособленного от других объектов и имеющего специфические закономерности функционирования и развития. Вместе с тем при использовании этого принципа необходимо проанализировать связи исследуемого объекта с другими.

В соответствии с принципом связанности внутренние процессы объектов должны рассматриваться в комплексной зависимости как от внешних, так и от внутренних факторов.

Принцип организованности основывается на результатах структурной упорядоченности исследуемой системы. При этом в процессе исследования элементов и связей системы в виде упорядоченной (иерархической) структуры конкретизируются в прикладном аспекте принципы целостности и связанности.

Реализация основных принципов системного подхода при исследовании надежности технических систем позволяет выделить следующие *основные аспекты* их изучения:

- системно-элементный, предусматривающий в качестве начального этапа исследования объекта систему изучения его элементного состава. Обычно этот этап заключается в декомпозиции системы на элементы;
- системно-структурный, предусматривающий изучение разнотипных связей, объединяющих элементы в систему;
- системно-функциональный, связанный с изучением поведения элементов системы и функционирования системы в целом;



Рисунок 4.1 — Общая схема исследования надежности технических систем

– системно-надежностный, предусматривающий определение надежности системы с точки зрения концепции «слабого» элемента, заключающейся в выделении группы функционально значимых элементов, расчете их работоспособности и надежности, расчете схемной надежности системы по данным о надежности элементов.

Согласно указанным аспектам изучения систем общая схема исследования надежности технической системы при системном подходе будет иметь вид, показанный на рисунке 4.1.

## 5

### МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

---

В настоящее время понятие «система» постоянно упоминается в научной литературе и различных инженерных дисциплинах. Несмотря на достаточную ясность этого понятия, но в связи с его многозначностью (например, солнечная система, система управления, система координат, система функций, система единиц, политическая, социальная, экономическая, мировая системы и др.), существовало много различных мнений (как у нас, так и за рубежом) по поводу определения понятия «система». Остановимся на определении, достаточно полно раскрывающим сущность данного понятия с точки зрения поставленных задач.

**Система** — взаимосвязанная совокупность отдельных элементов, образующих единое целое, предназначенное для выполнения одной или нескольких каких-либо функций.

В зависимости от выполняемых функций и вида составляющих элементов системы получают специальное название: социальная, политическая, биологическая, техническая, механическая, технологическая и др.

Можно отметить важную роль в понятии «система» принципа целостности, согласно которому взаимосвязь и взаимодействие объектов порождает новые, системные свойства объекта, не присущие его отдельным элементам. Это значит, что не всякую совокупность элементов можно назвать системой. Только правильно собранная машина, линия или агрегат могут представлять собой техническую систему, обладающую принципиально новыми свойствами и функциями, которых нет у отдельных элементов системы.

Техническая система обладает функциональными, временными и пространственными связями между элементами [28]:

$$T = \{H, F, S, Z\}, \quad (5.1)$$

где  $H$  — множество связей системы с окружающей средой;

$F$  — выполняемая функция системы;

$S$  — структура системы;

$Z$  — набор свойств состояния системы.

Под окружающей средой понимают объекты, не входящие в рассматриваемую систему, но изменение свойств которых каким-либо образом влияет на систему.

Для описания взаимодействия системы со средой используются понятия «вход», «выход» и «состояние». Окружающая среда действует на системы через входные параметры:  $H = (h_1, h_2, \dots, h_n)$ , где  $n$  — размерность вектора входа. В результате действия входных параметров система будет находиться в разных состояниях, которые задаются набором свойств  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_{rr})$ . Функционирование системы характеризуется выходными параметрами  $F = (f_1, f_2, \dots, f_{mm})$ .

Неотрывно с системой связано понятие «структура», характеризующего в общем случае способ организации целого из составных частей, т. е. сеть связей между элементами системы [29]. В зависимости от задачи исследования структура системы может быть различной. В общем случае система имеет многоуровневую (иерархическую) структуру  $S$ : на верхнем уровне расположены сверхсложные системы  $S_i$ , ниже стоят сложные системы  $S'_{ij}$ , еще ниже — простые системы  $S''_{ijk}$ , на самом нижнем уровне — элементы системы  $(s_1, s_2, \dots, s_{nn})$ . В свою очередь, в зависимости от поставленных задач, и элементы могут быть представлены в виде систем. Разнообразием технических систем являются механические и технологические системы.

Простые элементы состоят из кинематических пар и звеньев. Простейший элемент может состоять из одной кинематической пары или звена. Естественно, расчленение (декомпозиция) технической системы (ТС) на элементы — условная операция. Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленных задач [1].

За элемент можно принимать более сложный узел, например, зубчатую пару вместе с валами и подшипниками. В сверхсложной и сложной системах в качестве элементов могут служить подсистемы. Примерами простых ТС являются: привод, редуктор, механизм передвижения, суппорт, коробка скоростей и т. п.; сложных: простой станок, агрегат, головка станка и т. п.; сверхсложных систем: агрегатные станки, автоматизированные комплексы, автоматические линии и т. п.

Элементы в ТС отличаются между собой как свойствами, так и мерой ответственности в выполнении функции системы. Техническая система работоспособна в том случае, если она спроектирована рационально, все элементы участвуют в выполнении целевой функции системы. Резервные элементы, если они есть, также начинают работать при отказе основных. При таком условии все элементы ТС должны быть определенным образом организованы и связаны между собой. Одни элементы начинают функционировать только после начала функционирования другого или других, вторые, наоборот, управляют функционированием нескольких элементов или одного элемента, третьи функционируют без каких-либо управляющих воздействий, оказываемых на элемент, или исходящих от него, поэтому для обозначения различия связей между элементами введем понятия активной и пассивной связей.

**Активными связями** между элементами будем называть такие связи, которые определяют функционирование элемента в зависимости от другого.

**Пассивные связи** — связи, при которых функционирование элемента не зависит от функционирования связанных с ним других элементов. Элемент может быть связан с одним или несколькими элементами системы.

При анализе системы рассматривают ее идеализированную модель в виде структуры системы без учета свойств (субстанции) связей. Такая модель носит название структурной модели системы.

Данная модель является концептуальной, так как она не настолько формализована, чтобы можно было путем точных математических расчетов решить поставленную задачу [30].

Однако уровень такой концептуальной модели вполне достаточен для того, чтобы дать четкую математическую формулировку всех поставленных задач исследования объекта.

К моделям обычно предъявляют следующие основные требования:

1) объективное отражение сущности и всех основных сторон и свойств рассматриваемого объекта, соответствие цели конкретной задачи исследования;

2) обеспечение получения всех данных для определения показателей цели задачи, реакция на изменение параметров системы, максимальная простота [31].

По учету характера времени модели разделяются на динамические, статические и кинематические.

Техническая система состоит из конечного числа различных элементов, поэтому соответствующая ей структурная модель должна быть конечной, кинематической и дискретной. Для того чтобы получить данное представление о ТС необходимо иметь как можно больше данных о субстанции элементов, структуре связей между ними, субстанции самой структуры. Однако в связи с тем, что ТС состоит из множества разнотипных элементов, объем информации будет громоздким, сама информация разноречива, поэтому чрезвычайно трудно провести анализ системы с учетом этих данных.

Значительно выгодней на первом этапе анализа умышленно ограничить информацию о ТС и считать, что структура ТС состоит лишь из связей, не учитывая индивидуальных свойств элементов. При таком подходе от системы остается лишь абстрактный структурный скелет, в котором элементы — это всего лишь места пересечения связей. Вне системы каждый элемент перестает существовать, так как не имеет никаких индивидуальных свойств. Такое представление ТС позволяет более точно установить структурную значимость каждого элемента в сложной иерархии ТС без давления субстанции элемента.

**Структурной значимостью элемента** называется степень связанности, характеризуемая количеством и качеством связей рассматриваемого элемента с другими элементами ТС. Модель ТС представляет собой граф  $G(X, R)$ , где  $X$  — множество составляющих его вершин, а  $R$  — множество связей между вершинами.

Граф изображается в виде нарисованной на плоскости схемы, состоящей из вершин (кружков)  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  элементов системы, соединенных линиями-связями или отношениями между элементами  $(r_1, r_2, \dots, r_m)$  [32]. Граф называется смешанным, если элементы

соединены между собой неориентированными ребрами  $r$  (пассивные связи) и ориентированными  $\vec{r}$  (активные связи). Ориентированные ребра называют еще дугами [31]. Дуга  $r_{ij}^a$  проходит от вершины  $x_i$  к соседней вершине  $x_j$ , индекс  $a$  обозначает номер дуги, когда из вершины  $x_i$  выходят несколько дуг.

Граф  $G$ , у которого две вершины соединены более чем одним ребром, называется *мультиграфом*. Таким образом, структурная модель ТС изображается в виде смешанного мультиграфа (рис. 5.1). В теории графов методы анализа разработаны в основном для упорядоченных (только ориентированных или только неориентированных) графов [32].

Смешанный граф можно преобразовать в ориентированный, если заменить неориентированные ребра между инцидентными вершинами противоположно направленными дугами (рис. 5.2).

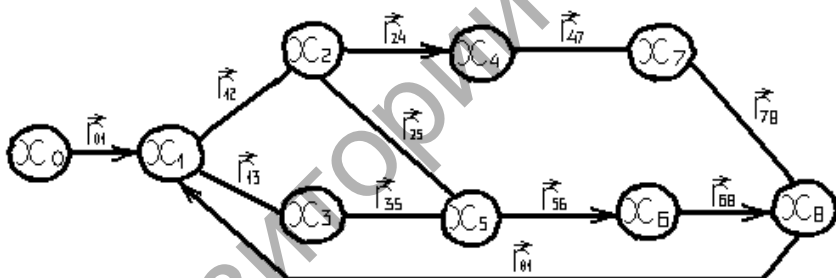


Рисунок 5.1 — Модель технической системы (смешанный мультиграф)

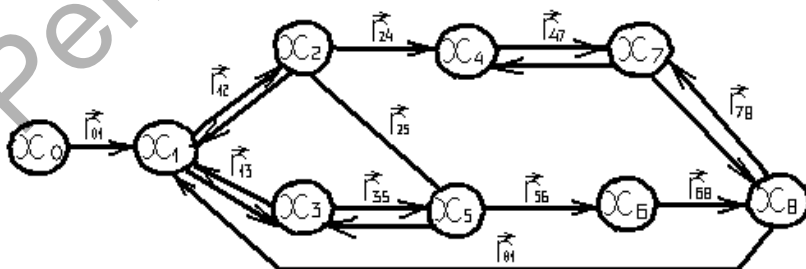


Рисунок 5.2 — Ориентированный мультиграф

Действительно, например, отношения между такими звеньями кинематической пары, как подшипник и вал не изменяются, если пассивную связь между ними заменить двумя активными, но противоположно направленными: вал-подшипник и подшипник-вал.

Во множество вершин  $G$  графа ТС включается особая вершина  $x_0$ , обозначающая окружающую среду, под которой можно также принимать взаимодействие рассматриваемой ТС с другими системами или окружающей средой.

## 6

### ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

---

Согласно определению техническая система предназначена для выполнения определенных операций, связанных с преобразованием параметров механического движения. В теоретической механике под механическим движением в общем случае понимается изменение положения твердого тела с течением времени в пространстве по отношению к другим телам. В соответствии с принципом целостности ТС рассматривается как замкнутая система, получающая энергию от какого-либо источника и преобразующая эту энергию в механическое движение. В этом случае ТС обладает определенной целевой функцией: перемещением выходного элемента ТС в пространстве в заданных пределах с заданным законом и интенсивностью движения при ограничениях по параметрам надежности (ресурсу и вероятности безотказной работы).

Для выполнения целевой функции ТС должна потреблять энергию некоторой мощности, т. е. ТС должна быть нагружена, иметь некоторую передаточную функцию для преобразования механического движения в пространстве. Эти свойства ТС являются необходимыми с точки зрения соответствия принципу целостности системы, так как они обеспечивают выполнение целевой функции ТС. Таким образом, механическое движение возможно при наличии таких параметров, как сила, скорость и закон перемещения. При этом, если входные параметры сила и скорость не зависят от ТС, то параметр закон перемещения, с одной стороны, предопределяет, а с другой — зависит от структуры и свойств ТС.

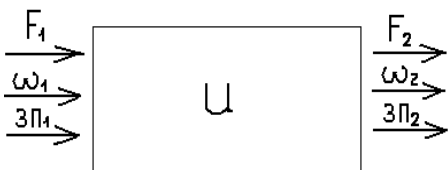


Рисунок 6.1 — Модель функционирования ТС

Для выполнения закона перемещения ТС должна обладать передаточной функцией. На выходе ТС получает преобразованные параметры механического движения: силу, скорость и закон перемещения (рис. 6.1).

Обозначим входные параметры ТС:  $F_F$  — сила,  $\omega_1$  — скорость,  $3\Pi_1$  — закон перемещения, выходные параметры соответственно:  $F_2$ ,  $\omega_2$  и  $3\Pi_2$ , тогда

$$\{F_2, \omega_2, 3\Pi_2\} = u\{F_1, \omega_1, 3\Pi_1\} \quad (6.1)$$

является целевой функцией ТС при ограничениях

$$P(t) \geq [p(t)], \quad t \geq [t], \quad (6.2)$$

где  $P(t)$  и  $t$  — вероятность безотказной работы и ресурс ТС;

$[p(t)]$  и  $[t]$  — заданные значения вероятности безотказной работы и ресурса ТС.

Действительно, если  $F_1$ ,  $\omega_1$ ,  $3\Pi_1$  есть переменные, то путем соответствующего преобразования с помощью передаточной функции  $u$  можно получить параметры  $F_2$ ,  $\omega_2$ ,  $3\Pi_2$ , т. е.

$$F_2 = u(F_1), \quad \omega_2 = u(\omega_1), \quad 3\Pi_2 = u(3\Pi_1). \quad (6.3)$$

Целевая функция непосредственно определяет показатели функционирования системы.

У т в е р ж д е н и е. Показатель функционирования ТС есть вектор, характеризующий свойство ТС, без которого функционирование ТС невозможно. Совершенно очевидно, что при отсутствии любого из параметров ( $F$ ,  $\omega$ ,  $3\Pi$  и  $u$ ) механическое движение преобразовать нельзя, поэтому показателями функционирования ТС должны быть векторы, связанные с параметрами механического движения ТС, т. е.  $K_F$  — показатель нагруженности, зависящий от сил, действующих на ТС  $\{K_F = f(F_1, F_2)\}$ ,  $K_\omega$  — показатель скорости  $\{K_\omega = f_2(\omega_1, \omega_2)\}$ ,  $K_{3\Pi}$  — показатель, характеризующий закон перемещения ТС  $\{K_{3\Pi} = f_3(3\Pi_1, 3\Pi_2)\}$ ,  $K_u$  — показатель передаточной функции ТС

$\{K_u = f(u)\}$ . Обобщенный показатель функционирования ТС представляет собой множество показателей, характеризующих отдельные свойства ТС

$$K_{\Sigma} = \{K_F, K_{\omega}, K_{3П}, K_u\}. \quad (6.4)$$

Принцип целостности системы выражается также в том, что свойства и функции элементов ТС некоторым образом определяются, с одной стороны, ее целевой функцией, с другой стороны, особенности элементов предопределяют выполнение целевой функции ТС, т. е. свойства и функции элемента являются взаимопределимыми со свойствами целого [33]. Следовательно, каждый элемент системы может быть охарактеризован комплексным показателем функционирования, представляющим множество показателей, соответствующих показателям функционирования системы, а также характеризующих свойства элементов, связанных с функционированием системы. Доля участия элемента в выполнении целевой функции системы, т. е. функции элемента, заключающейся в преобразовании параметров механического движения, в теории машин и механизмов выражается обычно передаточной функцией, которая может быть численно выражена для кинематических пар, имеющих постоянные размеры, передаточным отношением.

Для высших пар передаточное отношение — это отношение угловых скоростей, для низших пар — отношение линейных скоростей. Передаточное отношение выражается обычно через отношение угловых либо линейных перемещений

$$\left. \begin{aligned} i_{12} &= \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d\varphi_1}{dt} \frac{dt}{d\varphi_2} = \frac{d\varphi_1}{d\varphi_2}, \\ i_{12} &= \frac{v_1}{v_2} = \frac{dS_1}{dt} \frac{dt}{dS_2} = \frac{dS_1}{dS_2}, \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  и  $v_1, v_2$  — угловая и линейная скорости соответственно звеньев 1 и 2;

$d\varphi_1, d\varphi_2$  и  $dS_1, dS_2$  — угловые и линейные перемещения звеньев 1 и 2 за время  $dt$ .

Элемент с большим передаточным отношением при одинаковой с другими элементами конструктивной сложности обладает большими геометрическими размерами и наличием большего числа структуры материала, масштабного фактора и т. п. [34].

Увеличение нагрузки, как правило, приводит к увеличению напряжения в звеньях кинематических пар и, следовательно, способствует более интенсивному износу рабочих поверхностей деталей, а также появлению и развитию усталостных трещин, что является причинами отказов элементов ТС. Таким образом, увеличение нагруженности элемента при прочих равных условиях снижает его надежность.

Аналогично на надежность элемента оказывает влияние и интенсивность функционирования, связанная со скоростью перемещения элемента. При увеличении интенсивности функционирования элемент системы за тот же срок службы обрабатывает большее количество рабочих циклов, следовательно, более подвержен износу и усталостным разрушениям.

Увеличение интенсивности функционирования происходит также при наличии нескольких режимов работы элемента, обуславливающих переменные напряжения в деталях, что приводит к снижению работоспособности элемента.

Элементы в ТС, как правило, не являются однотипными, они отличаются конструкцией, что существенно влияет на их функционирование. Для функционирования системы важным является конструктивная сложность элемента с точки зрения кинематических возможностей, которая может быть оценена количеством кинематических пар или звеньев, составляющих элемент. В ряду, составленном из элементов, обладающих различной конструктивной сложностью, т. е. имеющих различное число кинематических пар, наименее надежным будет тот элемент, который содержит наибольшее число кинематических пар.

Рассмотренные показатели взаимосвязаны, так как характеризуют свойства элементов, обусловленные функционированием системы, поэтому их можно объединить в один комплексный показатель функционирования

$$k_x = \{k_F, k_\omega, k_{3П}, k_u, k_c\}, \quad (6.6)$$

где  $k_F$  — показатель нагруженности элемента;  
 $k_{\omega}$  — показатель интенсивности функционирования элемента;  
 $k_{ЗП}$  — показатель закона перемещения элемента;  
 $k_u$  — показатель передаточной функции элемента;  
 $k_c$  — показатель конструктивной сложности элемента.

## 7

### КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Точность прогнозирования надежности системы в большей степени зависит от источника информации. Профессор А. С. Проников указывает на три основных источника информации [6]:

- 1) результаты статистической обработки данных по эксплуатации и ремонту систем;
- 2) данные испытаний на надежность, в том числе и ускоренных испытаний;
- 3) результаты аналитических расчетов.

Профессор Р. В. Кугель приводит семь источников информации, которые основаны на экспериментальных данных и отличаются лишь количеством рассматриваемых элементов, т. е. выборкой [35].

В большинстве работ по надежности вопрос получения информации для расчета показателей надежности вообще не рассматривается. Считается, что данные в том или ином объеме имеются, поэтому главным является достаточно правильная математическая обработка с целью получения достоверных выводов.

Как было показано выше, на стадии проектирования данные о надежности систем и их элементов для вновь проектируемых систем, как правило, отсутствуют. В то же время имеется в наличии конструкторская документация, которая является конечным результатом работы конструкторов в конструкторских бюро и одновременно исходным материалом для производства изделия. В большей степени будущая надежность изделия зависит от того, как оно спроектировано.

Процесс разработки нового изделия условно можно разбить на два этапа: научно-исследовательскую разработку (НИР) и опытно-конструкторскую разработку (ОКР). На этапе НИР осуществляется расчетная проработка изделия, заканчивающаяся научно-техническим

отчетом, в котором содержится анализ проведенных исследований, рекомендации о принципах построения изделий и возможности реализации этих принципов. На этапе ОКР теоретические результаты НИР получают инженерное воплощение в виде схемы и конструкции изделия.

Здесь же решаются экономические задачи, проводятся теоретические, расчетные и экспериментальные исследования. Этап ОКР заканчивается выпуском полного комплекта конструкторской документации на изделие, изготовлением и испытанием его опытного образца.

Конструкторская документация согласно *ГОСТ 2.102-68 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов* состоит из графических и текстовых документов. К графическим конструкторским документам относятся: чертежи деталей, сборочный чертеж, чертеж общего вида, габаритный чертеж, монтажный чертеж, схемы и спецификация.

К текстовым конструкторским документам относятся пояснительная записка, технические условия, программа и методика испытания, расчеты, ведомости спецификаций покупных изделий, ссылочных документов и т. д.

Таким образом, в конструкторской документации имеется в полном объеме вся информация, необходимая для изготовления спроектированного изделия.

В настоящее время существуют различные методики, схемы, модели рационального проектирования сложных технических систем, позволяющие облегчить труд проектировщика и ускорить процесс проектирования системы [25; 28]. Конструктор, разрабатывая чертежи будущего изделия, вооружен необходимой информацией, имеющейся в различных справочниках, стандартах, патентах и другой технической литературе. Однако, несмотря на все это многообразие обстоятельств, помогающих рационально спроектировать будущую конструкцию, реальное проектирование во многом зависит от опыта конструктора, его интуиции и творческих способностей.

Конструкторская документация отражает как качество будущего изделия, так и качество самого процесса проектирования. Возможность заложить (на стадии проектирования) и изготовить соответствующее изделие в значительной мере определяется как новизной и сложностью предъявляемых к нему требований, выраженных в техническом задании, так и опытом и квалификацией конструкторов,

оптимальностью выбранных технических решений, тщательностью оформления конструкторских документов.

Поскольку технические системы проектируются и изготавливаются в небольшом количестве экземпляров, возможность проведения массовых испытаний их на надежность практически исключена. Все, что не удалось учесть и предвидеть в процессе разработки, все неудачные решения обнаруживаются лишь при вводе системы в эксплуатацию, поэтому чрезвычайно важно на начальных этапах проектирования получить как можно больше данных для прогнозирования надежности будущего изделия.

Разработка конструкторской документации в конструкторском бюро является результатом коллективного труда конструкторов, расчетчиков, технологов. Прежде чем конструкторская документация поступает на производство, она неоднократно проверяется и уточняется квалифицированными специалистами, поэтому можно полагать, что информация, заложенная в конструкторской документации, заслуживает доверия, тем более, что она является также исходной для изготовления спроектированной системы.

Анализ конструкторской документации может дать весьма ценную информацию, которую необходимо использовать при расчете надежности спроектированной технологической системы.

Действительно, из технических требований на систему, отдельные узлы и детали определяются условия (режимы работы, нагруженность, окружающая среда и т. п.) работы как системы в целом, так и отдельных ее элементов.

Анализ сборочных чертежей и схем позволяет установить функциональные и структурные связи между отдельными элементами, оценить простоту или сложность конструкции. Из чертежей на отдельные детали определяются характеристики материалов, из которых они изготовлены, параметры твердости и шероховатости рабочих поверхностей деталей, вид термообработки, размеры и точность изготовления и т. п. Кроме того, в конструкторской документации имеются расчеты деталей на прочность, точность, расчеты допусков и посадок.

Анализ конструкции ТС должен начинаться с изучения структуры системы и ее составных частей. В результате изучения чертежа общего вида, сборочных, монтажных, габаритных чертежей, схем и рабочих чертежей деталей, пояснительной записки, технических условий, расчетов составляется содержательное описание системы,

которое является исходным материалом для последующей формализации исследуемой системы и расчета количественных характеристик показателей функционирования элементов системы.

Содержательное описание концентрирует сведения о физической природе и количественных характеристиках элементов исследуемой системы, степени и характере взаимодействия между ними, месте и значении каждого элемента в общем процессе функционирования рассматриваемой реальной системы.

Содержательное описание ТС включает следующее:

- 1) назначение ТС;
- 2) целевую функцию ТС;
- 3) место системы в общем процессе функционирования более сложной системы, куда она входит;
- 4) состав ТС (подсистемы, элементы);
- 5) описание связей между подсистемами и элементами ТС;
- 6) основные технические характеристики как ТС в целом, так и ее элементов;
- 7) характер и интенсивность взаимодействия элементов между собой.

Кроме того, в содержательное описание включаются исходные данные в виде численных значений основных характеристик и параметров системы и элементов, соответствующих показателям функционирования. В качестве исходного материала для составления содержательного описания ТС служит не только информация, взятая из конструкторской документации, но и данные, если они имеются, полученные в результате испытаний или эксплуатации аналогичных ТС и элементов, разработанных ранее.

Содержательное описание ТС является основой для расчета частных и комплексных показателей функционирования элементов, характеристик работоспособности функционально значимых элементов ТС.

## 8

### АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ ЗНАЧИМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

---

Структурная модель ТС записывается в виде конечной квадратной матрицы  $R_n = \|r_{ij}\|_{n \cdot n}$ , где  $n$  — число вершин графа  $G$ , а элемент матрицы  $r_{ij}$ , стоящий на пересечении  $x_i$  строки с  $x_j$  столбцом, определяет

число дуг, инцидентных вершинам  $x_i$  и  $x_j$ . Такая матрица называется матрицей смежности графа  $G$ . Для графа  $G$ , изображенного на рисунке 5.2, матрица смежности имеет следующий вид:

$$\|r_{ij}\| = \begin{vmatrix} 0 & \mathbf{r} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{r} & r_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{r} & 0 & r_{12} & r_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{r} \\ 0 & r_{21} & 0 & 0 & \mathbf{r} & r_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{31} & 0 & 0 & 0 & r_{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{r} & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{47} & 0 \\ 0 & 0 & r_{52} & r_{53} & 0 & 0 & r_{56} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{r} & 0 & 0 & \mathbf{r} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{74} & 0 & 0 & 0 & r_{78} \\ 0 & \mathbf{r} & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{r} & r_{87} & 0 \\ \mathbf{r} & r_{81} & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{86} & r_{87} & 0 \end{vmatrix} \quad (8.1)$$

В этой матрице элементы, обозначенные  $\mathbf{r}$ , означают активную связь,  $r_{ij}$  — пассивную.

Для ориентированного графа элементы матрицы смежности  $R_n = \|r_{ij}\|_{n \cdot n}$  с учетом качественного различия между пассивными и активными связями будем определять по следующим выражениям:

- 1) при наличии активной связи

$$r_{ij} = 2 \Rightarrow [(x_i < x_j) \text{ или } (x_i > x_j)] \in X; \quad (8.2)$$

- 2) при наличии пассивной связи

$$r_{ij} = 1 \Rightarrow (x_i \leftrightarrow x_j) \in X; \quad (8.3)$$

- 3) при отсутствии связи между элементами

$$r_{ij} = 0 \Rightarrow (x_i \neq x_j) \in X. \quad (8.4)$$

С учетом формул (8.2)—(8.4) матрица смежности для графа (см. рис. 5.1) будет иметь следующий вид:

$$\|r_{ij}\| = \begin{vmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (8.5)$$

Структурная значимость элемента характеризуется количеством связей элемента с другими элементами системы. Следовательно, для определения структурной значимости достаточно сложить элементы матрицы по строкам. Обозначим структурную значимость  $i$ -го элемента  $r_{xi}$ , тогда

$$r_{xi} = \sum_{j=1}^m r_{ij}, \quad (8.6)$$

где  $r_{ij}$  — элемент матрицы в  $j$ -м столбце и в  $i$ -й строке.

Вычислим значения структурной значимости для каждого элемента, получим

$$\left. \begin{aligned} r_{x0} &= r_{01} = 2, \\ r_{x1} &= r_{10} + r_{12} + r_{13} + r_{18} = 6, \\ r_{x2} &= r_{21} + r_{24} + r_{25} = 4, \\ r_{x3} &= r_{31} + r_{35} = 2, \\ r_{x4} &= r_{42} + r_{47} = 3, \\ r_{x5} &= r_{52} + r_{53} + r_{56} = 4, \\ r_{x6} &= r_{65} + r_{68} = 4, \\ r_{x7} &= r_{74} + r_{78} = 2, \\ r_{x8} &= r_{81} + r_{86} + r_{87} = 5. \end{aligned} \right\} \quad (8.7)$$

Анализируя формулы (8.7), можно выделить элементы с наибольшими числовыми значениями:  $r_{x1}$ ,  $r_{x8}$ ,  $r_{x2}$ ,  $r_{x5}$ ,  $r_{x6}$ . Элементы  $r_{x2}$ ,  $r_{x5}$   $r_{x6}$

имеют одинаковые числовые значения, несмотря на то, что количество и вид связей у этих элементов различный (см. рис. 5.2).

Для того чтобы отличить их друг от друга усилим влияние активных связей методом последовательной итерации [36].

Структурная значимость  $i$ -го элемента при итерированной силе  $k$ -го порядка ( $k = 2, 3, \dots, n$ ) определяется по формуле

$$r_{xi}^k = 2^{k-1} \sum \mathbf{r}_m + \sum r_n, \quad (8.8)$$

$$j = (1 \dots m \dots n),$$

где  $\mathbf{r}_m$  и  $r$  — соответственно активная и пассивная связь между двумя инцидентными элементами.

Для элементов матрицы (8.5) получим следующие значения структурной значимости, подсчитанные методом последовательной итерации по формуле (8.2):

Элемент	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
$r_{x0}$	2	4	8
$r_{x1}$	6	10	18
$r_{x2}$	4	6	10
$r_{x3}$	2	2	2
$r_{x4}$	3	5	9
$r_{x5}$	4	6	10
$r_{x6}$	4	8	16
$r_{x7}$	2	2	2
$r_{x8}$	5	9	17

Анализируя результаты последовательной итерации, можно заметить, что при силе порядка  $k = 1$  три элемента ( $r_{x2}$ ,  $r_{x5}$ ,  $r_{x6} = 4$ ) имеют одинаковую структурную значимость, при силе порядка  $k = 2$  и  $k = 3$  из трех элементов выделяется один ( $r_{x6}$ ), а остальные два элемента остаются равными. Если внимательно изучить структуру системы (см. рис. 5.1), то можно видеть, что элементы системы  $x_5$  и  $x_6$  имеют совершенно одинаковые структурные связи, поэтому дальнейшая

итерация не даст никаких изменений с точки зрения распределения элементов по значениям структурной значимости.

При определении структурной значимости элементов системы не учитывается роль каждого элемента в функционировании системы, все элементы считаются одинаковыми обезличенными с точки зрения структуры системы, поэтому показатель структурной значимости будет недостаточной характеристикой.

Необходимо оценить элемент по параметрам, характеризующим его функционирование в системе и степень ответственности в выполнении целевой функции системы. Таким показателем является комплексный показатель функционирования элемента.

## 9

### РАСЧЕТ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТА

---

Показатели функционирования элемента характеризуют его с точки зрения доли участия в выполнении целевой функции системы. Следовательно, элемент должен обладать определенной передаточной функцией, быть нагруженным, перемещаться с определенной скоростью по некоторому закону, состоять из одной или нескольких кинематических пар и звеньев. Все эти параметры имеют разную размерность, и для того чтобы сравнивать различные элементы по соответствующим показателям, последние должны иметь единую шкалу измерения.

Для каждого параметра элемента определяем его нормированное значение, в качестве которого принимается среднее значение параметра для  $m$  элементов системы:

$$[p] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_i. \quad (9.1)$$

Формула (9.1) справедлива в том случае, если считать, что ТС спроектирована рационально и все элементы работоспособны.

Показатель функционирования определяется как отношение конкретного значения параметра  $p_i$  к нормированному значению  $p_{ni}$ :

$$k_i = p_i / p_{ni}. \quad (9.2)$$

Необходимо учесть, что если элемент имеет несколько значений параметра по рассчитываемому показателю, то в расчет принимается максимальное значение  $p_{i\max}$ . Если  $i$ -й элемент ТС представляет собой кинематическую цепь, то для расчета показателей  $k_{Ni}$ ,  $k_{ui}$  берутся максимальные значения соответствующих параметров  $N_{\max}$ ,  $u_{\max}$  из ряда значений, определенных для каждой кинематической пары этой цепи.

Совокупность показателей функционирования характеризует элемент с разных сторон с точки зрения доли участия в функционировании системы, поэтому комплексный показатель функционирования представляет собой объединение частных показателей. Если каждый частный показатель принять за переменную, то, применив операцию конъюнкции из булевой алгебры, получим для комплексного показателя следующее выражение:

$$X_{xi} = \prod_{i=1}^n x_i = x_1 \mathbf{I} x_2 \mathbf{I} \dots \mathbf{I} x_n.$$

Если перейти к обычной алгебре и заменить переменные частными показателями функционирования, то комплексный показатель функционирования будет иметь следующий вид:

$$k_{xi} = \prod_{i=1}^n k_i = k_F k_{\omega} k_{3\Pi} k_u k_c. \quad (9.3)$$

Необходимо учитывать, что ТС и соответствующие их элементы могут функционировать в нескольких режимах. Продолжительность работы  $i$ -го элемента в  $j$ -м режиме учитывается относительным коэффициентом

$$a_{ij} = \frac{t_j}{\sum_{j=1}^c t_j}; \quad (9.4)$$

$$0 \leq a_{ij} \leq 1,$$

где  $t_j$  — продолжительность работы  $i$ -го элемента в  $j$ -м режиме;

$\sum_{j=1}^c t_j$  — общая продолжительность работы элемента на различных режимах.

В этом случае комплексный показатель  $i$ -го элемента, имеющего  $l$  режимов работы, имеет следующий вид:

$$k_{xi} = \sum_{j=1}^l a_{ij} \left( \prod_{i=1}^n k_i \right). \quad (9.5)$$

В формуле (9.5) частные показатели функционирования приняты равнозначными, т. е. весовые коэффициенты для всех  $k_i = 1$ . Это допущение справедливо в том случае, если рассматриваются элементы, принадлежащие одной системе или подсистеме. В этом случае ошибка, получающаяся при вычислении комплексных показателей функционирования, будет одинаковой для всех элементов системы, а при их сравнении не будет оказывать существенного влияния на результаты анализа.

Если же рассматривать элементы, принадлежащие разным системам одной сложной системы, то в этом случае необходимо учитывать весовые коэффициенты при частных показателях функционирования, а формула (9.5) запишется следующим образом:

$$k_{xi} = \sum_{j=1}^l a_{ij} \left( \prod_{i=1}^n \alpha_i k_i \right), \quad (9.6)$$

где  $\alpha_i$  — весовые коэффициенты при частных показателях функционирования,  $\alpha_i \leq 1$ .

Определение весовых коэффициентов при частных показателях функционирования, согласно *ГОСТ 23 554.1-79 Экспертные методы оценки качества промышленной продукции*, производится на основе экспертного опроса.

10

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗНАЧИМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И ФОРМИРОВАНИЕ ГРУППЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Комплексный показатель, с одной стороны, с точки зрения соответствия целевой функции системы, характеризует внутренние резервы элемента, позволяющие выполнять поставленные элементу задачи. С другой стороны, в соответствии с принципами системного подхода, комплексный показатель отражает условие целостности. Для

выполнения требований связанности и организованности необходимо при анализе элементов учитывать их внешние свойства, что осуществляется с помощью структурно-функционального анализа системы.

Структурный граф является наиболее полным отражением как структуры системы, так и связей между элементами системы. Анализ структурного графа и применение метода последовательных итераций дает возможность оценить структурную значимость каждого отдельного элемента системы.

Однако при этом внутренние свойства элементов не учитываются, так как элементы в структурном графе представлены в виде вершин — мест пересечения активных и пассивных связей. Субстанция элементов в структурном графе не выражена.

Показатель, оценивающий роль элемента в функционировании системы и его структурную значимость, назовем *функциональной значимостью элемента* и обозначим  $\Phi_i$ .

Оценка функциональной значимости элементов производится путем преобразования структурного графа  $G$  в функциональный  $G'$ . При этом в качестве вершин графа  $G'$  берется множество ребер  $U$  графа  $G$ , а в качестве ребер графа  $G'$  взято множество вершин графа  $G$ .

Таким образом, функциональный граф  $G'$  состоит из множества вершин, где каждая вершина является функцией перехода, и из множества ребер, где каждое ребро есть элемент системы.

Преобразовывать следует смешанный мультиграф  $G$ , так как в этом случае функциональный граф  $G'$  получается значительно проще.

Если преобразовывать ориентированный мультиграф  $G'$ , то количество вершин функционального графа возрастет ровно в  $2d$  раз, где  $d$  — количество пассивных связей. При этом точность последующего анализа совершенно не изменяется. На рисунке 10.1 представлен функциональный граф  $G'$ , преобразованный из структурного графа  $G$  (см. рис. 5.2).

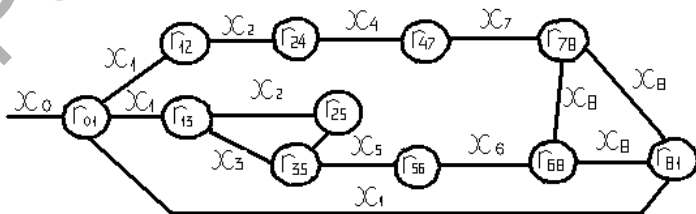


Рисунок 10.1 — Функциональный граф TC

Для определения показателей функциональной значимости элементов необходимо произвести численный анализ структурного и функционального графов системы, для чего вершинам и ребрам графов придаются соответствующие веса. В качестве весов ребер функционального графа  $G^*$  служат комплексные показатели функционирования элементов. В этом случае вершины функционального графа представляют собой некоторую формируемую внутри ТС функцию, а ребра, входящие в данную вершину, — элементы ТС, формирующие эту функцию. Для функционального графа  $G^*$  (см. рис. 10.1) матрица смежности будет иметь следующий вид:

$$\begin{array}{r|cccccccccccc}
 & r_{01} & r_{12} & r_{13} & r_{24} & r_{25} & r_{35} & r_{47} & r_{56} & r_{18} & r_{68} & r_{78} \\
 r_{01} & 0 & k_1 & k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_1 & 0 & 0 \\
 r_{12} & 0 & 0 & 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 r_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2 & k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 r_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 r_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 r_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 & 0 & 0 & 0 \\
 r_{47} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_7 \\
 r_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 & 0 \\
 r_{18} & k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 r_{68} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_8 & 0 & 0 \\
 r_{78} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_8 & k_8 & 0 \\
 \hline
 R_{\Sigma} & k_1 & k_1 & k_1 & k_2 & k_2 & k_4 & k_6 & k_6 + k_8 & k_7 & & \\
 & & & & & & & k_3 & + k_5 & k_1 & + & 2k_8
 \end{array} \quad (10.1)$$

Ранг вершин  $R_{\Sigma}$  функционального графа по входам показывает, какое количество элементов формирует входную функцию для данного элемента — ребра, выходящего из вершины функционального графа. Каждый элемент ТС может быть связан лишь с одним или несколькими инцидентными элементами, поэтому ранг любой  $i$ -й вершины функционального графа определяется по матрице смежности путем сложения комплексных показателей тех элементов, с которыми связан рассматриваемый элемент:

$$R_{\Sigma j} = \sum_{j=1}^m k_{ij}, \quad k_{ij} \in K_j, \quad (10.2)$$

где  $K_j$  — множество элементов в  $j$ -м столбце матрицы смежности функционального графа.

Поскольку вершины функционального графа соответствуют дугам структурного графа, то, придав последним вес, соответствующий рангам вершин функционального графа, можно определить показатели функциональной значимости элементов ТС, которые соответствуют рангам вершин структурного графа.

Определяя при анализе ранги вершин функционального графа по выходам, учитывают тем самым сложность подаваемой на вход элемента функции, а определяя ранги по входам вершин структурного графа, принимают во внимание сложность вырабатываемой им функции.

Для определения показателей функциональной значимости записывается матрица смежности структурного графа, в качестве элементов которой подставляют значения рангов вершин функционального графа:

	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$\Phi_i$
$x_0$	0	$\overset{\cdot}{k}_1$	0	0	0	0	0	0	0	$2k_1$
$x_1$	$\overset{\cdot}{k}_1$	0	$k_1$	$k_1$	0	0	0	0	$k_1+2k_8$	$6k_1 + 4k_8$
$x_2$	0	$k_1$	0	0	$\overset{\cdot}{k}_2$	$k_2$	0	0	0	$k_1 + 3k_2$
$x_3$	0	$k_1$	0	0	0	$k_3+k_5$	0	0	0	$k_1 + k_3$
$x_4$	0	0	$\overset{\cdot}{k}_2$	0	0	0	0	$k_4$	0	$k_2 + k_4$
$x_5$	0	0	$k_2$	$k_3+k_5$	0	0	$\overset{\cdot}{k}_6$	0	0	$k_2 + k_3 + k_5 + 2k_6$
$x_6$	0	0	0	0	0	$\overset{\cdot}{k}_6$	0	0	$k_6 + k_8$	$4\overset{\cdot}{k}_6 + 2k_8$
$x_7$	0	0	0	0	$k_4$	0	0	0	$k_7$	$k_4 + k_7$
$x_8$	0	$k_1+2\overset{\cdot}{k}_8$	0	0	0	0	$k_6+k_8$	$k_7$	0	$2\overset{\cdot}{k}_1+2k_6+k_7+6k_8$

Сумма элементов в каждой строке матрицы соответствует функциональной значимости элементов

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^n (R_{\Sigma_j})_i, \quad (R_{\Sigma_j}) \in R_{\Sigma\Sigma}, \quad (10.3)$$

где  $R_{\Sigma\Sigma}$  — множество элементов в  $i$ -й строке матрицы смежности структурного графа.

Каждому элементу  $x_i$  соответствует свое значение функциональной значимости  $\Phi_i$ . При суммировании по формулам (10.3) элементы матрицы, соответствующие активным связям (обозначенные сверху стрелками), согласно условию (8.2), удваиваются. Подставляя значения комплексных показателей в выражения показателей функциональной значимости элементов, вычисленных по формулам (9.5) и (9.6), получим численные значения показателей, характеризующих в совокупности структурную значимость элементов и долю их участия в выполнении целевой функции системы. Естественно, эта характеристика учитывает большее число параметров элемента с точки зрения обеспечения надежности системы по сравнению с показателем структурной значимости элементов, принимаемым во многих работах [37—38] в качестве основной характеристики элемента при расчете надежности систем. Однако и показатель функциональной значимости не является достаточно полной характеристикой элемента, так как он не учитывает субстанции элемента. Наиболее простым элементом технологической системы является кинематическая пара или звено.

Кинематические пары и звенья отличаются между собой видом (зубчатая пара, фрикционная, кулачковая), типом (передача, опора, шарнир, инструмент и т. п.), размерами, материалами и термообработкой, конфигурацией звеньев и другим, т. е. каждый элемент обладает множеством параметров, характеризующих его субстанцию. Субстанция элемента существенно влияет на его надежность и, в конечном счете, на надежность системы. Чем полнее будут учтены все параметры, характеризующие субстанцию элемента, его структурную и функциональную значимость, тем точнее будут определены показатели надежности элементов и системы. Технические системы обычно состоят из большого количества элементов, поэтому изучение субстанции всех элементов системы для последующего использования в расчетах надежности системы представляет собой значительный объем работы.

С целью уменьшения времени и объема расчетов в последующей оценке работоспособности элементов имеет смысл ограничить количество элементов, подлежащих рассмотрению, т. е. выделить группу функционально значимых элементов, от которых в наибольшей степени зависит надежность ТС.

У этих элементов показатели функциональной значимости должны быть наибольшими, так как элемент, у которого показатель функциональной значимости численно больше по сравнению с остальными,

находится в более напряженных условиях функционирования (более нагружен, связан с большим числом других элементов, конструктивно более сложен и т. д.). Число элементов, входящих в группу функционально значимых элементов, зависит от того, насколько полно данная группа включает в себя элементы, имеющие наименьшую работоспособность.

Определить число элементов, входящих в группу функционально значимых, можно, если задан допустимый уровень функциональной значимости  $\{\Phi\}$ , тогда функционально значимыми элементами будут те элементы, у которых  $\Phi_i \geq \{\Phi\}$ .

Допустимый уровень  $\{\Phi\}$  может быть определен по следующим соображениям: ТС не может состоять только из слабых элементов, так как это противоречило бы принятому ранее условию о том, что ТС априорно работоспособна. Практика показывает, что отказ ТС наступает из-за отказа одного или нескольких элементов, оказавшихся наиболее слабыми из-за износа или усталости. Это же положение принято в качестве концептуальной модели надежности ТС, поэтому предположительно слабыми элементами берутся элементы с наибольшими значениями показателя функциональной значимости, которые находятся в наиболее *напряженных* условиях функционирования. Наименьший из трех показателей функциональной значимости и будет допустимым уровнем  $\{\Phi\}$ . Если окажутся элементы в ТС, у которых значения  $\Phi_i$  близки к  $\{\Phi\}$ , то они включаются в группу функционально значимых элементов. Группа функционально значимых элементов может быть определена по следующему выражению:

$$L_{\Phi} \geq \lambda L_{\Sigma}, \quad (10.4)$$

где  $L_{\Phi}$  — число функционально значимых элементов;

$L_{\Sigma}$  — общее число элементов системы;

$\lambda$  — коэффициент представительности, зависящий от сложности ТС.

Если задана нижняя оценка вероятности безотказной работы элемента  $p_n$  и точность определения надежности элементов  $\beta$  по условию

$$p_i - p_n \leq \pm\beta, \quad (10.5)$$

а также известна вероятность безотказной работы  $p_i$  хотя бы одного элемента ТС, то можно определить функционально значимые элементы

следующим образом. Для любого  $i$ -го элемента ТС вероятность безотказной работы может быть вычислена по формуле (10.6), если подставить вместо характеристик работоспособности  $x_i$  соответствующие значения функциональной значимости:

$$p_i = p_u \frac{\Phi_u}{\Phi_i}, \quad (10.6)$$

где  $p_u$  и  $\Phi_u$  — вероятность безотказной работы и числовое значение показателя функциональной значимости для известного элемента ТС;

$\Phi_i$  — числовое значение показателя функциональной значимости рассчитываемого  $i$ -го элемента.

Для заданного нижнего уровня оценки вероятности безотказной работы соответствующее значение показателя функциональной значимости (оно является допустимым) определяется по формуле

$$\{\Phi\} = \Phi_u \frac{p_u}{p_n}. \quad (10.7)$$

Вычтем  $p_n$  из левой и правой части (10.6), получим

$$p_i - p_n = p_u \frac{\Phi_u}{\Phi_i} - p_n. \quad (10.8)$$

Подставив формулу (10.7) в (10.8) и решив выражение (10.8) относительно  $\Phi_i$ , получим

$$\Phi_i \geq \frac{p_u \Phi_u}{p_n \pm \beta}. \quad (10.9)$$

Элементы, удовлетворяющие условию формулы (10.9), являются функционально значимыми и подлежат дальнейшему анализу.

Таким образом, для формирования группы функционально значимых элементов необходимо провести следующие действия:

1) вычислить показатели функциональной значимости  $\Phi_i$  для каждого элемента ТС;

2) ранжировать показатели функциональной значимости  $\Phi_i$  от  $\Phi_{i\max}$  до  $\Phi_{i\min}$ , т. е. построить ряд показателей функциональной значимости, на первом месте которого стоит максимальное значение  $\Phi_{i\max}$  относительно всех подлежащих исследованию элементов ТС, на втором месте максимальное значение из  $(n - 1)$  оставшихся элементов и т. д.;

3) выделить из полученного ряда элементов  $L_\Sigma$  те, которые имеют максимальные величины показателей функциональной значимости.

Эти элементы образуют группу  $L_\Phi$  функционально значимых элементов, которая должна обеспечить исходную информацию для прогнозирования конструкторской надежности ТС.

## 11

### СУБСТАНЦИИ И КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТА

**Под субстанцией элемента** понимаются существенные основные свойства, обеспечивающие его работоспособность. Согласно *ГОСТ 27.002-83-89 Надежность в технике. Термины и определения* работоспособное состояние объекта определяется как состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической или конструкторской документации.

Таким образом, работоспособность можно охарактеризовать совокупностью признаков, изменяющихся в определенных пределах. Выход какого-либо признака за пределы допуска приводит к отказу объекта.

Признаки, позволяющие оценить работоспособное состояние объекта, называются **критериями работоспособности**.

**Критерий** — это стандарт, с помощью которого производится оценка целей данного уровня [31]. Он должен отвечать следующим *основным условиям*, т. е. быть:

1) представительным (отражать основную, а не второстепенную информацию об объекте);

2) критичным и варьируемым (достаточно сильно изменяться при изменении параметров, зависящих от принятого решения);

3) единственным, тогда возможно строгое математическое решение задачи. Однако в большинстве случаев оказывается, что критериев может быть много. Тогда существует несколько подходов к решению задачи. Первый из них состоит в сведении ряда критериев к одному

$$\Theta_{\Sigma} = \alpha_1 \Theta_1 + \alpha_2 \Theta_2 + \alpha_3 \Theta_3, \quad (11.1)$$

где  $\Theta_i$  — частные критерии;

$\alpha_i$  — коэффициенты важности (весовые коэффициенты).

Недостаток этого подхода состоит в трудности определения весовых коэффициентов при критериях.

Второй подход состоит в превращении части критериев в ограничения. В тех случаях, когда удается обосновать ограничения по дополнительным критериям, такой подход оправдан [31].

Третий подход состоит в ранжировании критериев, т. е. расположении их в порядке важности;

4) способным правильно учитывать неполноту информации, которая может быть стохастической, но при известных характеристиках рассеивания параметров — полной неопределенности относительно ряда параметров и вредных факторов, ухудшающих состояние системы. В последнем случае для определения критерия используются методы теории статистических решений и теории игр.

При неизвестных величинах весовых коэффициентов все частные критерии считаются равновероятными, а обобщенный критерий определяется как критерий Лапласа

$$\Theta_{ii} = \sum \Theta_{ij}. \quad (11.2)$$

Критерий Лапласа применим, когда о субстанции элемента ничего неизвестно. Если же известны законы распределения частных критериев (зависящих от определенных параметров элемента), то обобщенный критерий определяется по следующей формуле:

$$\bar{\Theta}_i = \sum_j \Theta_{ij} p_j. \quad (11.3)$$

Если частный критерий имеет максимальное и минимальное значение, то в этом случае для его определения используется формула Гурвица [36]

$$\Theta_{ri} = m\Theta_{ij\max} + (1-m)\Theta_{ij\min}, \quad (11.4)$$

где  $\Theta_{ij\max}$  и  $\Theta_{ij\min}$  — максимальное и минимальное значения частного критерия;

$\mu$  — коэффициент, выбираемый исходя из специфики задачи.

При  $\mu = 1$  оценка производится по наиболее выгодным результатам (оптимистическая оценка), выбор осуществляется по  $\max[\max \Theta_{ij}]$ .

При  $\mu = 0$  оценка производится по наиболее пессимистическим данным. Этот критерий называется критерием Вальда. Он соответствует самой осторожной оценке

$$\Theta_{Bi} = \Theta_{ij\min}. \quad (11.5)$$

Здесь фактически выбирается  $\max[\min \Theta_{ij}]$  — основной критерий теории игр. Применение его целесообразно при наличии противодействующих (вредных) факторов.

Критерий Сэвиджа представляет собой разницу между действительным значением и наиболее благоприятным

$$\Theta_{ci} = |\Theta_{ij} - \Theta_{ij\max}|. \quad (11.6)$$

Здесь оптимальное решение находится из условия минимума разницы, т. е.

$$\min \Theta_{ci} = \min |\Theta_{ij} - \Theta_{ij\max}|. \quad (11.7)$$

Критерий Лапласа для обобщенного критерия и критерии Гурвица, Вальда, Сэвиджа для частных критериев могут применяться в случае сравнения однотипных элементов, когда имеется полная определенность

об их субстанции. Если же сравнение производится для разнородных элементов, то в этом случае необходимо вводить в формулу обобщенного критерия весовые коэффициенты при частных критериях, т. е.

$$\Theta = \alpha_1 \Theta_1 + \alpha_2 \Theta_2 + \dots + \alpha_n \Theta_n, \quad (11.8)$$

где  $\alpha_1 \dots \alpha_n$  — весовые коэффициенты частных критериев.

Определение весовых коэффициентов производится следующими методами: статистическими, множественной корреляции, линеаризации функций случайных величин, статистических испытаний, экспертных оценок [36].

Все методы определения весовых коэффициентов предполагают наличие достаточного объема информации о законах распределения и пределах изменения числовых значений частных критериев. Если такой информации нет, то эти методы не могут быть использованы.

На стадии проектирования ТС, как правило, такая информация отсутствует. Для определения весовых коэффициентов частных критериев работоспособности можно использовать метод экспертных оценок, процедура которого в данном случае будет состоять из нескольких этапов:

- 1) разработки анкетных вопросов;
- 2) выбора экспертов;
- 3) опроса экспертов;
- 4) математической обработки результатов опроса, т. е. собственно определения весовых коэффициентов [36].

В качестве объективного эксперта при определении весовых коэффициентов частных критериев работоспособности элементов ТС может выступать техническая информация (техническая литература, справочники, статьи в технических журналах, патенты, авторские свидетельства и т. п.). Нужно лишь научиться правильно использовать и обрабатывать эту информацию, а экспертов привлекать для изыскания основных алгоритмов этой обработки [39].

Опыт эксплуатации и расчетов элементов ТС позволяет в качестве основных критериев работоспособности элементов принять следующие:

- 1) прочность;
- 2) износостойкость;
- 3) жесткость;
- 4) устойчивость;

- 5) теплостойкость;
- 6) виброустойчивость;
- 7) коррозионную стойкость,  $\alpha$ ;
- 8) точность.

Таким образом, работоспособность элемента может быть представлена моделью в виде вектора  $\Theta_i$ , компонентами которого являются критерии работоспособности

$$|\Theta_i| = \begin{vmatrix} \Theta_i^1 \\ \Theta_i^2 \\ \dots \\ \Theta_i^n \end{vmatrix} \quad \text{или} \quad \mathbf{r} \Theta_i = \|\Theta_i^k\|, \quad (11.9)$$

где  $k = 1 \dots n$  — номер.

Если расчет функционально значимых элементов произведен по одним и тем же критериям работоспособности и известны весовые коэффициенты  $\alpha_i$ , то работоспособность каждого элемента может быть выражена следующим образом:

$$|\Theta_i| = \begin{vmatrix} \alpha_1 \Theta_1^1 \\ \alpha_2 \Theta_1^2 \\ \mathbf{KK} \\ \alpha_n \Theta_1^n \end{vmatrix}, \quad |\Theta_2| = \begin{vmatrix} \alpha_1 \Theta_2^1 \\ \alpha_2 \Theta_2^2 \\ \mathbf{KK} \\ \alpha_n \Theta_2^n \end{vmatrix}, \quad \dots \quad |\Theta_m| = \begin{vmatrix} \alpha_1 \Theta_m^1 \\ \alpha_2 \Theta_m^2 \\ \mathbf{KK} \\ \alpha_n \Theta_m^n \end{vmatrix}. \quad (11.10)$$

Для того чтобы определить слабые элементы, необходимо функционально значимые элементы сравнить между собой по работоспособности. Для этого назначаем «стандарт», т. е. элемент с нормированными значениями критериев работоспособности. За него принимается элемент, у которого критерии работоспособности имеют средние значения

$$|\bar{\Theta}_i| = \begin{vmatrix} \bar{\Theta}^1 \\ \bar{\Theta}^2 \\ \mathbf{K} \\ \bar{\Theta}^n \end{vmatrix}, \quad (11.11)$$

где  $\bar{\Theta}^1 = \frac{\sum \alpha_1 \Theta_i^1}{m}$ ,  $\bar{\Theta}^2 = \frac{\sum \alpha_2 \Theta_i^2}{m}$ , ...,  $\bar{\Theta}^n = \frac{\sum \alpha_n \Theta_i^n}{m}$ .

Если значения критериев работоспособности у рассматриваемого элемента будут меньше, чем у «стандарта», то такой элемент можно отнести к слабым. Следовательно, слабый элемент из числа функционально значимых определится по следующему условию:

$$\forall |\Theta^i| \left\{ \max \left( \left| \bar{\Theta} - |\Theta^i| \right| \right) \right\} \Leftrightarrow |\Theta^i| \in C, \quad (11.12)$$

где  $C$  — множество слабых элементов.

При невозможности рассчитать работоспособность функционально значимых элементов по критериям работоспособности используются абсолютные и косвенные информативные параметры.

12

## АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Структурно-функциональный анализ ТС позволяет выделить из всей совокупности элементов системы группу по показателю функциональной значимости элемента, учитывающей передаточную функцию, конструктивную сложность, нагруженность, интенсивность функционирования и структурную значимость. Однако любой элемент состоит из звеньев (деталей) и (или) кинематических пар, имеющих конструктивные (ширина, длина зуба, подшипника, модуль зацепления и т. п.), технологические (вид термообработки, шероховатость поверхностей, точность изготовления и т. п.) особенности, практически не учитываемые при структурно-функциональном анализе, но которые могут значительно влиять на работоспособность детали и элемента в целом.

Именно поэтому звенья и кинематические пары элементов, попавшие в группу функционально значимых, целесообразно исследовать расчетными методами, учитывающими конструктивные и технологические особенности деталей, по критериям износостойкости, прочности, точности, жесткости, теплостойкости, виброустойчивости и т. д.

Однако в большинстве случаев выполнить непосредственно эти расчеты для различных конкретных деталей не представляется возможным, так как отсутствуют не только данные для расчета, но и сами методы расчета. Кроме того, процессы утраты работоспособности, характеризуемые этими критериями, очень сложны, зависят от большого числа случайных различных факторов.

Так, на износ и прочность влияет более 50 различных (основных и второстепенных) факторов, которые весьма трудно учесть и определить, поэтому целесообразно находить другие методы, позволяющие рассчитать деталь по данному критерию [40].

Критерий работоспособности может быть выражен как функция многих переменных, в качестве которых выступают параметры  $p_i^j$  кинематических пар и звеньев, составляющих элемент ТС:

$$\Theta_i^j = f_i^j(p_1^j, p_2^j, \dots, p_k^j). \quad (12.1)$$

Например, большое влияние на износостойкость и прочность детали или кинематической пары оказывают такие параметры, как удельные и контактные нагрузки и давления, их распределение по контакту, соответствующие напряжения (контактные, растяжения-сжатия, изгиба, кручения и т. п.), разность твердостей сопрягаемых поверхностей, коэффициенты трения, относительные скорости скольжения, геометрические соотношения отдельных частей деталей, точность изготовления, виды режимов работы и целый ряд других факторов. В этом случае возможно сравнивать звенья и кинематические пары элементов системы не по критериям износостойкости и усталости непосредственно, а по параметрам, от которых они зависят.

Параметры, которые однозначно определяют состояние элемента по рассматриваемому критерию работоспособности, называются **информативными**.

Так, если критерием является прочность, то он может оцениваться коэффициентом запаса прочности

$$n = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} > [n], \quad (12.2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} n_{\sigma} &= \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_M \varepsilon_{\Pi}} \sigma_a + \varphi_{\sigma} \sigma_m}, \\ n_{\tau} &= \frac{\tau_{-1}}{\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_M \varepsilon_{\Pi}} \tau_a + \varphi_{\tau} \tau_m}. \end{aligned} \right\} \quad (12.3)$$

В этом случае информативными параметрами будут:

- 1)  $\sigma_{-1}, \tau_{-1}$  — пределы выносливости материалов по нормальным и касательным напряжениям;
- 2)  $\sigma_a, \tau_a$  — нормальные амплитудные и касательные напряжения;
- 3)  $\sigma_m, \tau_m$  — нормальные средние и касательные напряжения;
- 4)  $K_{\sigma}, K_{\tau}$  — эффективные коэффициенты концентрации при нормальных и касательных напряжениях;
- 5)  $\varepsilon_M, \varepsilon_{\Pi}$  — масштабный коэффициент и коэффициент качества поверхности;
- б)  $\varphi_{\sigma}, \varphi_{\tau}$  — коэффициенты влияния асимметрии цикла нагружения.

Информативные параметры делятся на абсолютные и косвенные.

*Информативными абсолютными параметрами* являются такие, которые входят в функциональные зависимости, определяющие соответствующий критерий работоспособности.

Так, параметры  $\sigma_{-1}, \tau_{-1}, \sigma_a, \tau_a, \sigma_m, \tau_m, K_{\sigma}, K_{\tau}, \varepsilon_M, \varepsilon_{\Pi}, \varphi_{\sigma}, \varphi_{\tau}$ , входящие в зависимости формул (12.3), определяющие критерий работоспособности прочность, являются информативными абсолютными параметрами. Не всегда все параметры, входящие в зависимости для определения числовых значений критериев работоспособности, известны, вследствие этого не удается провести расчет по заданному или выбранному критерию работоспособности. Если хоть один из параметров, входящих в формулы (12.2) и (12.3) (например,  $\sigma_{-1}$  или  $\tau_{-1}$ ), отсутствует, то рассчитать коэффициент запаса прочности  $n$  нельзя.

В то же время могут быть известны данные, которые в какой-то мере характеризуют свойства деталей по заданному критерию. Так,

в нашем случае могут быть известны, например, характеристики выносливости материала деталей не при симметричном знакопеременном цикле напряжений, а при каком-то асимметричном цикле напряжений или же известны совсем иные характеристики, которые не позволяют получить абсолютные значения  $\sigma_{-1}$  и  $\tau_{-1}$ , но в определенной мере могут характеризовать напряженность детали, например, изменение режима работы детали, т. е. изменение нагрузки, частоты функционирования и т. п. В этом случае оценку работоспособности элемента по заданному критерию сделать не удастся, однако сравнение элементов между собой можно произвести, но не по критериям работоспособности, а по параметрам, от которых зависит работоспособное состояние элементов, при этом можно привлечь к анализу также и такие параметры, которые не входят в функциональные зависимости критериев работоспособности, но являются параметрами, характеризующими в какой-либо степени работоспособное состояние элемента.

Параметры, которые не входят в функциональные зависимости критериев работоспособности, но характеризуют какие-либо свойства детали, называются **информативными косвенными параметрами**.

Так, косвенный параметр твердость не входит в формулы (12.3) коэффициентов запаса прочности, но абсолютные параметры  $\sigma_{-1}, \tau_{-1}, \sigma_a, \tau_a, \sigma_m, \tau_m, K_\sigma, K_\tau, \varepsilon_M, \varepsilon_\Pi, \phi_\sigma, \phi_\tau$  зависят от твердости материала деталей и в зависимости от твердости работоспособность детали может изменяться в широких пределах.

При анализе работоспособности кинематических пар и звеньев элементов по информативным параметрам следует проверить их по критериям достаточности, существенности и некоррелированности [43].

Требование существенности системы параметров заключается в том, что среди параметров  $p_i$  нет ни одного, который был бы одинаковым по величине для всех сравниваемых элементов

$$p_{ij} \neq \text{const}, \quad j=1, 2, \dots n. \quad (12.4)$$

Если же найдется  $p_{ij} = \text{const}$ , то он должен быть исключен из системы параметров.

Требование достаточности системы параметров заключается в том, что среди всех рассматриваемых элементов нет элементов с совершенно одинаковыми параметрами

$$p_{ij} = p_{ik}, \quad j=1, 2, \dots n. \quad (12.5)$$

Требование некоррелированности системы параметров заключается в том, что среди параметров  $p_i$  нет ни одной пары, численные значения которых были бы функционально связаны. Если имеется функциональная связь между параметрами  $p_i$  и  $p_j$ , то один из них исключается.

Таким образом, сравнение элементов группы между собой производится на основании анализа группы параметров для  $l$  кинематических пар и  $m$  звеньев, на которые расчленены эти элементы. Допускаемые величины этих параметров обычно зависят от режима работы сопряжений и деталей, поэтому кинематические пары и звенья, на которые расчленены отобранные элементы, следует разделить на три группы по виду режима работы:

1) одноразового действия, время которых мало и несоизмеримо со временем работы системы;

2) длительного действия при постоянной нагрузке, число включений которых и продолжительность функционирования соизмеримы с соответствующими показателями системы;

3) длительного действия с переменной нагрузкой, число включений которых больше числа включений системы, а продолжительность функционирования соизмерима.

Если кинематическая пара или звено могут быть отнесены к каким-либо двум группам (например, зубчатое колесо, зубья которого работают длительно с переменной нагрузкой, а диск и ступица — длительно и с постоянной нагрузкой), то его следует включать в группу с более жесткими условиями работы (более жестким режимом).

Кинематические пары и звенья одноразового действия в дальнейшем рассматривать с точки зрения влияния на работоспособность системы из-за усталости и износа не имеет смысла.

Для всех параметров по каждой кинематической паре и звену определяются коэффициенты близости, исходя из определенных условий. Если увеличение действительного значения параметра по

сравнению с нормированным значением должно приводить к снижению работоспособности рассматриваемой кинематической пары или звена, то коэффициент близости рассчитывается по формуле

$$p_{ij} < \bar{p}_{nj} \Rightarrow Y_{ij} = 1 - \left| \frac{\Delta p_{ij}}{\Delta p_{nj}} \right|. \quad (12.6)$$

Если же увеличение действительного значения параметра по сравнению с нормированным значением должно приводить к повышению работоспособности, то коэффициент близости рассчитывается по формуле

$$p_{ij} > \bar{p}_{nj} \Rightarrow Y_{ij} = \left| \frac{\Delta p_{ij}}{\Delta p_{nj}} \right|, \quad (12.7)$$

где  $i$  — порядковый номер кинематической пары или звена,  $i = 1, l$ ;  
 $j$  — порядковый номер параметра,  $j = 1, n$ ;  
 $\bar{p}_{nj}$  — нормированное значение  $j$ -го параметра, рекомендуемое практикой, а при отсутствии таких рекомендаций, определяемое как среднее арифметическое

$$\bar{p}_{nj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{nj}, \quad (12.8)$$

где  $\Delta p_{ij} = \left| \bar{p}_{nj} - p_{ij} \right|$  — модуль разности между нормированным значением и конкретным значением  $j$ -го параметра для  $i$ -й кинематической пары элемента;

$\Delta p_{nj} = \text{ext} \left| \bar{p}_{nj} - p_{ij} \right|, p_{ij} \in D$  — экстремальное значение модуля разности между нормированным и максимальным или минимальным значениями  $j$ -го параметра для  $i$ -й кинематической пары или звена элемента, при этом минимальное и максимальное значения измерены для одного параметра и взяты из множества измеренных значений  $D$ .

Можно записать далее, что

$$\begin{aligned} \text{ext} \left| \bar{p}_{ij} - p_{ij} \right| &= \sup \left| \bar{p}_{ij} - p_{ij} \right| \cup \inf \left| \bar{p}_{ij} - p_{ij} \right|, \\ \sup \left| \bar{p}_{ij} - p_{ij} \right| &= \left| \bar{p}_{ij} - p_{ij \min} \right|, \\ \inf \left| \bar{p}_{ij} - p_{ij} \right| &= \left| \bar{p}_{ij} - p_{ij \max} \right|. \end{aligned} \quad (12.9)$$

Если имеются статистические данные по рассматриваемому параметру, т. е. ряд случайных числовых значений параметра, то можно показать, что в этом случае коэффициент близости, выраженный в процентах, есть не что иное, как коэффициент вариации. Коэффициент вариации равен отношению среднего квадратического отклонения  $S$  к среднему арифметическому значению параметра  $\bar{p}_{ij}$  [42]:

$$v = \frac{S}{\bar{p}_{ij}} 100\%.$$

Среднее квадратическое отклонение параметра равно

$$S = \sqrt{\frac{\left[ \sum (\bar{p}_{ij} - p_{ij})^2 m_p \right]}{\sum m_p}}.$$

Если  $m_p = 1$ ,  $S = (\bar{p}_{ij} - p_{ij})$ , тогда

$$v = \frac{\bar{p}_{ij} - p_{ij}}{\bar{p}_{ij}} 100\% = \left( 1 - \frac{p_{ij}}{\bar{p}_{ij}} \right) 100\%. \quad (12.10)$$

Выражение в круглых скобках в формуле (12.10) есть не что иное, как коэффициент вариации.

Коэффициент близости  $Y_{ij}$  к нормированному значению, изменяющийся в пределах  $0 > Y_{ij} \geq 1$ , является характеристикой кинема-

тических пар и звеньев, которая позволяет сравнивать последние между собой

$$x_j = \sum_j Y_{ij}. \quad (12.11)$$

Таким образом, алгоритм сравнения элементов между собой следующий:

- 1) элементы расчленяются до уровня кинематических пар и звеньев;
- 2) для каждой кинематической пары и звена определяются коэффициенты близости к нормированному значению по информативным параметрам и находится их сумма  $\sum_j Y_{ij}$ , которая является характеристикой пары или звена;

- 3) составляется характеристика элемента, включающая сумму характеристик элементов, на первом месте которой стоит элемент с наименьшей характеристикой.

Если элемент состоит из однотипных звеньев, подлежащих сравнению, влияние информативных параметров на сумму коэффициентов близости идентично и зависит лишь от конструктивных различий звеньев. Если элемент состоит из разнородных звеньев, влияние каждого параметра в сумме коэффициентов близости должно учитываться соответствующим весовым коэффициентом, который может быть найден методом экспертных оценок [42] или путем эксперимента.

Необходимо отметить, что алгоритм сравнения аналогичен и при расчете по другим критериям (точности, жесткости и т. п.), отличие состоит лишь в параметрах, по которым определяются коэффициенты близости.

При определении слабых элементов следует использовать информацию о работоспособности если не самих элементов, то, по крайней мере, их аналогов. В зависимости от наличия сведений об элементах ТС их можно разбить на три группы:

- 1) имеющие идентичные аналоги в других ранее разработанных и эксплуатируемых системах, т. е. по данным элементам есть полная информация о работоспособности;

- 2) имеющие аналоги в других ранее разработанных и эксплуатируемых системах, отличающихся по конструктивному исполнению и условиям эксплуатации, но позволяющие получить ориентировочные оценки показателей работоспособности данных элементов;

- 3) разработанные впервые и являющиеся оригинальными.

Наименьшую информацию по работоспособности имеют элементы третьей группы, после них идут элементы второй группы, а затем — первой группы. Таким образом, на основе имеющейся информации в число слабых элементов следует включать элементы, не только обладающие наименьшими значениями показателей, перечисленных выше, но и имеющие минимум информации по сравнению с другими элементами ТС.

Элемент, занимающий первое место в ряду приоритетности, должен в первую очередь быть подвергнут анализу, расчетам и (если необходимо) испытаниям с целью получения показателей его надежности.

Если этот элемент, имеющий наименьшую характеристику работоспособности, удовлетворяет требованиям надежности, то остальные элементы, имеющие большие значения характеристик работоспособности, можно не рассматривать.

Проведем прогнозирование надежности для ТС, изображенной на рисунке 5.1. Положим сначала, что надежность элементов ТС пропорциональна показателям их структурной значимости [37]. Составим уравнение для надежности системы по ее структурному графу (см. рис. 5.1). Схема соединения элементов является смешанной, элементы  $x_0$  и  $x_1$  соединены последовательно, далее идут две параллельные цепочки из элементов  $x_2, x_5, x_6, x_8$  и  $x_3, x_5, x_6, x_8$ . Элемент  $x_8$  участвует дважды, так как обе цепочки замыкаются на этом элементе. Кроме того, от элемента  $x_2$  идет связь на элемент  $x_5$ , тем самым раздваивая схему на две параллельные цепи  $x_4, x_7, x_8$  и  $x_5, x_6, x_8$ . Далее от замыкающего элемента  $x_8$  идет обратная связь на элемент  $x_1$ .

Уравнение надежности данной системы будет иметь вид (знак  $t$  в скобках опустим)

$$P_c = p_0 p_1 \{ [1 - (1 - p_2)] [1 - (1 - p_4 p_7 p_8)(1 - p_5 p_6 p_8)] \dots (1 - p_3) \} p_1. \quad (12.12)$$

Если связь между  $x_2$  и  $x_5$  не учитывать, то уравнение надежности примет следующий вид:

$$P_c = p_0 p_1 [1 - (1 - p_2 p_4 p_7 p_8)(1 - p_3 p_5 p_6 p_8)] p_1. \quad (12.13)$$

Значения показателей структурной значимости для элементов были подсчитаны ранее по формуле (8.7).

Если известно, что для элемента  $x_1$ , например, вероятность безотказной работы  $p = 0,998$ , то для всех элементов, у которых  $x_i < b$   $p_i = 1$ . Следовательно, элементы  $x_0, x_2, \dots, x_8$  имеют  $p = 1$ .

Рассчитаем надежность системы по выражению (12.13). Получаются одинаковые значения, равные  $P_c = 0,996$ .

Далее будем считать известными комплексные показатели следующие элементов:  $\kappa_0 = 0$ ;  $\kappa_1 = 2,3$ ;  $\kappa_2 = 1,6$ ;  $\kappa_3 = 1,4$ ;  $\kappa_4 = 1,2$ ;  $\kappa_5 = 1,2$ ;  $\kappa_6 = 1,3$ ;  $\kappa_7 = 1,4$ ;  $\kappa_8 = 2,5$ .

В результате структурно-функционального анализа [см. (10.3)] получим следующие значения показателей функциональной значимости элементов:

$$\begin{aligned}\Phi_0 &= 2\kappa_1 = 4,6; \\ \Phi_1 &= 6\kappa_1 + 4\kappa_8 = 23,8; \\ \Phi_2 &= \kappa_1 + 3\kappa_2 = 7,1; \\ \Phi_3 &= \kappa_1 + \kappa_3 + \kappa_5 = 4,9; \\ \Phi_4 &= 2\kappa_2 + \kappa_4 = 3,6; \\ \Phi_5 &= \kappa_2 + \kappa_3 + \kappa_5 + 2\kappa_6 = 6,8; \\ \Phi_6 &= 4\kappa_6 + 2\kappa_8 = 10,2; \\ \Phi_7 &= \kappa_4 + \kappa_7 = 2,6; \\ \Phi_8 &= 2\kappa_1 + 2\kappa_6 + \kappa_7 + 6\kappa_8 = 24,2.\end{aligned}$$

Считаем также, что известна вероятность безотказной работы первого элемента  $p_1 = 0,998$ . Так как значение показателя функциональной значимости только у восьмого элемента больше, чем у первого, то для всех остальных элементов  $p = 1$ , а для  $x_8$

$$p_8 = p_1 \frac{\Phi_1}{\Phi_8} = 0,998 \frac{23,8}{24,2} = 0,962.$$

Надежность системы, вычисленная по уравнениям (12.12) и (12.13), соответственно равна  $P_c = 0,996$ ,  $P'_c = 0,990$ .

Выделим группу функционально значимых элементов. Пусть задана нижняя оценка вероятности безотказной работы  $p_n = 0,998$  и точность определения надежности элементов  $\beta = \pm 0,02$ .

Тогда по формуле (10.9) определим диапазон значений показателя функциональной значимости, которому соответствует функционально значимые элементы

$$\Phi_i \geq \frac{0,998 \cdot 23,8}{0,998 \pm 0,02} = \frac{23,3}{24,3}.$$

В диапазон значений показателя функционально значимых элементов попадают элементы первый и восьмой.

Пусть значения характеристик работоспособности для этих элементов будут следующими:  $x_{x1} = 2,9$ ;  $x_{x8} = 3,2$ . Тогда надежность системы, рассчитанная по уравнениям (12.12) и (12.13), будет равна  $P_c = 0,996$ . Из приведенного примера прогнозирования конструкторской надежности системы видно, что значения надежности системы, определяемые по показателям структурной и функциональной значимости, а также характеристики работоспособности элементов очень мало отличаются между собой.

Однако порядок элементов по работоспособности, а также порядок элементов, от которых в большей степени зависит надежность системы, изменяются.

Действительно, если построить ряд приоритетности элементов по показателям структурной значимости, то он будет выглядеть так:  $x_1, x_8, x_6, x_2, x_5, x_4, x_0, x_7, x_3$ .

Ряд приоритетности, построенный по показателям функциональной значимости, следующий:  $x_8, x_1, x_6, x_2, x_5, x_3, x_0, x_4, x_7$ .

По значениям характеристик работоспособности на первых местах оказываются восьмой и первый элементы.

Таким образом, предположительно слабым элементом являются восьмой элемент системы, который должен быть подвергнут более тщательным расчетам или же, при невозможности проведения расчетов, ускоренным испытаниям [43].

13

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Время между соседними отказами для элементов систем является случайной непрерывной величиной, которая характеризуется некоторым законом распределения.

В теории надежности встречаются следующие законы:

1. *Экспоненциальный закон*, для которого существует зависимости:

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= 1 - e^{-\lambda t}; & P(t) &= e^{-\lambda t}; \\ a(t) &= \lambda e^{-\lambda t}; & T &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}, \end{aligned} \right\} \quad (13.1)$$

где  $\lambda$  — параметр экспоненциального распределения;

$a(t)$  — частота отказов.

Дисперсия времени безотказной работы равна

$$D = \int_0^{\infty} t^2 a(t) dt = T^2 = \int_0^{\infty} t^2 \lambda e^{-\lambda t} dt - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (13.2)$$

Если  $\lambda t = 1$ , то

$$Q(t) \cong \lambda t = \frac{t}{T} \quad \text{и} \quad P(t) \cong 1 - \lambda t = 1 - \frac{t}{T}. \quad (13.3)$$

Важным свойством экспоненциального распределения является следующее: вероятность безотказной работы на интервале  $(t, t + \tau)$  не зависит от времени предшествующей работы  $t$ , а зависит только от длины интервала  $\tau$ .

Рассмотрим интервалы времени  $(0, t)$  и  $(0, t + \tau)$ , для которых можно записать

$$P(t + \tau) = P(t)P(\tau), \quad (13.4)$$

где  $P(t + \tau)$  — вероятность безотказной работы системы или элемента за время  $t + \tau$ ,

$P(t)$  — вероятность безотказной работы системы или элемента за время  $t$ ;

$P(\tau)$  — вероятность безотказной работы за время  $\tau$  при условии, что система или элемент безотказно проработали время  $t$ .

В случае экспоненциального закона  $P(t + \tau) = e^{-\lambda(t + \tau)}$  и  $P(t) = e^{-\lambda t}$ .

Подставляя второе выражение в первое, получим  $P(\tau)e^{-\lambda t}$ . Таким образом, условная плотность вероятности равна безусловной плотности вероятности, что подтверждает справедливость данного свойства.

В дальнейшем экспоненциальный закон времени безотказной работы будем называть экспоненциальным законом надежности. Графики, характеризующие экспоненциальное распределение, показаны на рисунке 13.1.

2. *Распределение Рэлея*, для которого основные характеристики имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= 1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \\ P(t) &= \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \\ a(t) &= \frac{1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \end{aligned} \right\} (13.5)$$

где  $\sigma$  — параметр распределения Рэлея.

Графики, характеризующие распределение Рэлея, показаны на рисунке 13.2.

Характеристики этого распределения следующие:

$$\left. \begin{aligned} T &= \int_0^{\infty} p(t) dt = \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt = \sqrt{2}\sigma \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma; \\ D &= \frac{\sigma}{2}(4 - \pi); \quad \lambda(t) = \frac{a(t)}{p(t)} = \frac{t}{\sigma^2}. \end{aligned} \right\} (13.6)$$

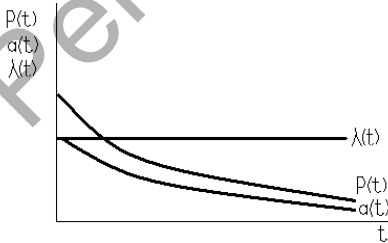


Рисунок 13.1 — Экспоненциальное распределение

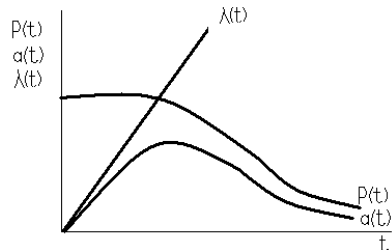


Рисунок 13.2 — Распределение Рэлея

### Пример

Определим характеристики надежности системы для экспоненциального закона распределения отказов и закона Рэлея.

1. *Экспоненциальное распределение.*

Предположим, что  $\lambda = 0,01 \text{ ч}^{-1}$ . Определим для  $t = 50 \text{ ч}$  величины  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $a(t)$ ,  $T$ .

$$P(50) = e^{-0,01 \cdot 50} = e^{-0,5} = 0,607.$$

$$Q(50) = 1 - P(50) = 0,393.$$

$$T = 1 / \lambda = 1 / 0,01 = 100 \text{ ч}, a(50) = e^{-0,01 \cdot 50} \approx 0,00607 \text{ ч}^{-1}.$$

2. *Закон Рэлея.*

Предположим, что  $\sigma = 100 \text{ ч}$ . Определим для  $t = 50 \text{ ч}$  величины  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$  и  $T$ .

$$P(50) = e^{-500 / 20000} = e^{-0,12} \approx 0,88.$$

$$Q(50) = 1 - P(50) \approx 0,12.$$

$$a(50) = 50 / 10000 e^{-2500 / 20000} = 0,005 \cdot 0,88 \approx 0,0044 \text{ ч}^{-1}.$$

$$\lambda(50) = 50 / 10000 = 0,005 \text{ ч}^{-1}.$$

$$T = \sqrt{\frac{\pi}{2}} 100 \approx 126 \text{ ч}.$$

3. *Нормальное распределение.* В случае если  $\sigma \ll T$  (практически, если  $T_1 \geq 3\sigma$ ), что наблюдается в большинстве случаев для элементов, используемых в сложных технологических системах, получим

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(x-T_1)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \\ P(t) &= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(x-T_1)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \\ a(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}\right], \end{aligned} \right\} \quad (13.7)$$

где  $T_1$  и  $\sigma$  — параметры нормального распределения.

Можно показать, что величина  $\lambda(t)$  для нормального распределения монотонно возрастает и после значения  $t = T_1$  начинает при-

ближаться к асимптоте  $y = \frac{(t-T_1)}{\sigma}$ ,  $T = T_1$ ,  $D = \sigma^2$ .

Если неравенство  $\sigma \leq T_1$  не соблюдается, следует использовать усеченное нормальное распределение. Графики, характеризующие нормальное распределение, показаны на рисунке 13.3.

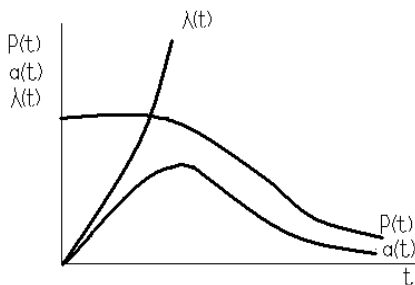


Рисунок 13.3 — Нормальное распределение

4. Гамма-распределение, для которого имеем

$$\left. \begin{aligned}
 Q(t) &= \frac{\lambda_0^k}{\Gamma(k)} \int_0^t x^{k-1} e^{-\lambda_0 x} dx, \\
 P(t) &= 1 - \frac{\lambda_0^k}{\Gamma(k)} \int_0^t x^{k-1} e^{-\lambda_0 x} dx = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}, \\
 a(t) &= \lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{k-1}}{\Gamma(k)} e^{-\lambda_0 t},
 \end{aligned} \right\} \quad (13.8)$$

где  $\lambda_0$  и  $k$  — параметры гамма-распределения;

$\Gamma(k)$  — гамма-функция.

После подстановки в соответствующие формулы для  $\lambda(t)$  и  $T$  получим

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda(t) &= \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{\Gamma(k) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}, \\
 T &= \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} dt = \frac{k}{\lambda_0}, \\
 D &= \frac{k}{\lambda_0^2}.
 \end{aligned} \right\} \quad (13.9)$$

Графики, характеризующие гамма-распределение при различных  $k$ , показаны на рисунке 13.4.

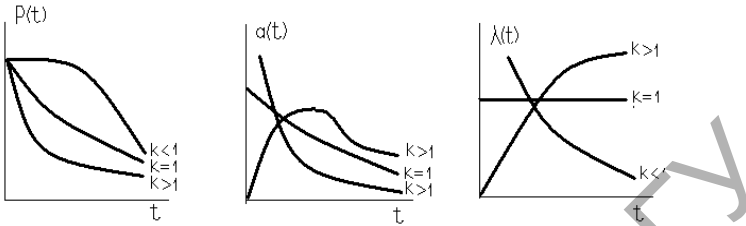


Рисунок 13.4 — Гамма распределение

При  $k = 1$  гамма-распределение переходит в экспоненциальное, а при целочисленных  $k$  — в распределение Эрланга. Кроме того, при  $k = \frac{m}{2}$  и  $\lambda = \frac{1}{2}$  имеем  $\chi^2$  — распределение.

5. Распределение Вейбулла, для которого имеем

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= 1 - e^{-\lambda_1 t^m}, \\ P(t) &= e^{-\lambda_1 t^m}, \\ a(t) &= \lambda_1 m t^{m-1} e^{-\lambda_1 t^m}, \end{aligned} \right\} \quad (13.10)$$

где  $\lambda_1$  и  $m$  — параметры распределения Вейбулла.

После подстановки в соответствующие формулы получим

$$\left. \begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{a(t)}{p(t)} = \lambda_1 m t^{m-1}, \\ T &= \int_0^{\infty} p(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t^m} dt = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right)}{\lambda_1^{1/m}}, \\ D &= \frac{\Gamma\left(\frac{2}{m} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m} + 1\right)}{\lambda_1^{2/m}}. \end{aligned} \right\} \quad (13.11)$$

Графики, характеризующие распределение Вейбулла для различных значений  $m$ , показаны на рисунке 13.5. При  $m = 1$  распределение Вейбулла переходит в экспоненциальное, а при  $m = 2$  — в распределение Рэлея.

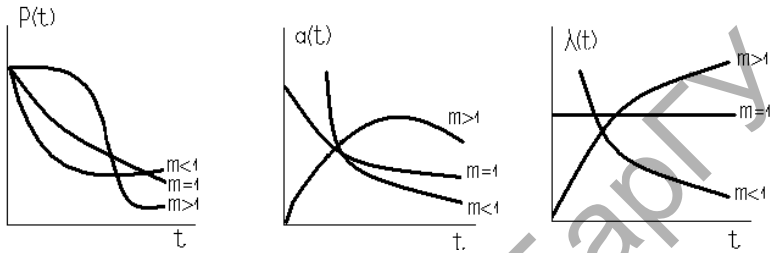


Рисунок 13.5 — Распределение Вейбулла

В ряде случаев удобно представлять теоретическое распределение в виде суперпозиции двух или более распределений. Тогда частота отказов суммарного распределения будет представлять собой сумму частот отказов, составляющих случайные величины. Таким образом,

$$a(t) = c_1 a_1(t) + c_2 a_2(t), \quad (13.12)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — весовые коэффициенты.

Очень часто встречаются суперпозиции двух экспоненциальных распределений

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= 1 - c_1 e^{-\lambda_1 t} - c_2 e^{-\lambda_2 t}, \\ P(t) &= c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}, \\ a(t) &= c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}. \end{aligned} \right\} \quad (13.13)$$

Очевидно, что  $c_1 + c_2 = 1$ . После подстановки в соответствующие формулы получим

$$\left. \begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{a(t)}{p(t)} = \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}}, \\ T &= \int_0^{\infty} p(t) dt = \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2}. \end{aligned} \right\} \quad (13.14)$$

Приведенные выше распределения характеризуют непрерывные случайные величины, например, время безотказной работы или время восстановления. Наряду с этим возникает необходимость оценки случайных дискретных величин, например, числа отказов в течение заданного промежутка времени.

Наиболее часто встречаются следующие распределения случайных дискретных величин.

6. *Биноминальное распределение.* Возможные значения случайной величины для него  $0, 1, \dots, n$ . Вероятность появления  $m$  благоприятствующих событий из общего числа  $n$  событий равна  $P_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m}$ .

Математическое ожидание и дисперсия соответственно равны

$$M[m] = np, \quad D[m] = npq, \quad (13.15)$$

где  $p$  — вероятность осуществления события при однократном испытании;

$q = 1 - p$  — вероятность отказов.

7. *Распределение Пуассона.* Возможные значения случайной величины для него  $0, 1, \dots, n$ . Вероятность появления  $m$  событий равна

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}. \quad (13.16)$$

Математическое ожидание и дисперсия соответственно равно

$$M[m] = \lambda; \quad D[m] = \lambda, \quad (13.17)$$

где  $\lambda$  — параметр распределения.

8. *Геометрическое распределение.* Возможные значения случайной величины для него 0, 1, ..., n. Вероятность появления события точно при m испытаниях равна

$$P_m = pq^{m-1}. \quad (13.18)$$

Математическое ожидание и дисперсия равны

$$M[m] = \frac{1}{p}, \quad D[m] = \frac{q}{p^2}, \quad (13.19)$$

где  $p$  — вероятность появления события при однократном испытании;

$q = 1 - p$  — вероятность отказов.

14

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ НА ИХ НАДЕЖНОСТЬ

Материалы и термообработка имеют решающее значение для качества (особенно надежности) и экономичности машин. Современные высокотехнологичные машины нельзя создать, не используя материалы с высокими характеристиками. Стоимость материалов составляет значительную часть стоимости машин, особенно при массовом производстве. Например, стоимость материалов в автомобилях составляет в среднем 65—70%, в грузоподъемных машинах — 70—75% от всей стоимости изделия.

Требования к материалам должны соответствовать критериям работоспособности деталей и по этим критериям назначаться для соответствующих деталей.

Деталей, подчиненных критерию *статической прочности*, немного. К ним относятся детали с большой начальной затяжкой (большинство крепежных винтов, заклепок, пружин), детали котлов и сосудов высокого давления, быстровращающиеся диски и некоторые другие детали с малым числом плавных нагружений соответственно длительному циклу работы машины.

К деталям, подчиненным критерию *циклической прочности*, относятся зубчатые колеса, валы и оси, шатуны, крепежные винты и пружины, подверженные переменным нагрузкам, станины кузнечно-прессовых, горных, строительных, транспортных и других машин, подверженных переменным нагрузкам, металлические конструкции грузоподъемных машин.

К деталям, подчиненных критерию *контактной статической и циклической прочности*, относятся детали узлов качения: подшипники, направляющие, шариковые пары винт-гайка, шариковые шлицевые соединения, зубчатые колеса, роликовые муфты, патроны и др.

Изготавливать детали, подчиненные критерию прочности, следует из материалов с высокими прочностными характеристиками. Особенно это относится к таким деталям как пружины, зубчатые колеса, валы и т. п.

Использование материалов с повышенными механическими характеристиками дает существенную экономию материалов и повышает технико-экономические показатели машин. Например, уменьшение массы редуктора на 1 кг приводит к уменьшению массы всей машины в среднем на 2,5 кг.

Огромными возможностями в направлении повышения прочностных, коррозионных и технических свойств деталей обладает *легирование сталей*. Прочность современных высокопрочных легированных сталей более чем в два раза выше прочности углеродистых сталей (при оптимальных термообработках).

Для повышения прочности *чугуна*, как известно, весьма эффективно его *модифицирование* добавкой в ковш небольшого количества графитизирующих элементов. При этом обеспечивается сферическая форма графита и резко снижается внутренняя концентрация напряжений. Новая технология непрерывного литья чугуновых деталей, разработанная в Могилеве в Институте технологии металлов, позволила получить чугуновые детали (например, поршневые кольца для двигателей внутреннего сгорания и компрессоров) с характеристиками, превосходящими такие же детали, изготовленные из стали.

К деталям, рассчитываемых по критерию жесткости, относятся станины, корпуса станков, коробок передач, валы, шпиндели, протяжки и др. Существуют следующие требования к материалам: высокий модуль упругости и технологические свойства, обеспечивающие возможность получения тонкостенных деталей.

## 14.1 Применение новых материалов для повышения надежности машин

---

К материалам предъявляются следующие требования:

- общее повышение прочности металлических материалов;
- снижение чувствительности материалов к концентрации напряжений, т. е. повышение сопротивления распространению трещин;
- уменьшение рассеивания характеристик материалов;
- создание особо прочных материалов;
- применение композитных материалов как средства принципиального снижения чувствительности материалов к концентрации напряжений, а в дальнейшем использование высокой естественной прочности монокристаллов; применение поликристаллических блоков для инструмента; широкое внедрение армированных конструкций;
- обеспечение стабильности упругих свойств материалов для упругих элементов;
- создание недорогих металлических материалов;
- разработка высокоизносостойких материалов с твердостью выше твердости абразива для работы в сильно абразивной среде;
- создание антифрикционных и фрикционных материалов.

В настоящее время очень многие детали, ранее изготавливаемые только из металла, создаются из других различных материалов. Например, если раньше в качестве отрезных пил в заготовительных цехах применялись стальные пилы, изготовленные целиком из инструментальной стали, то сейчас для этой цели применяют пилы с твердосплавными алмазными зубьями. В последнее время стали широко применять пилы-ленты, штампуемые из биметалла.

Очень широко применяются армированные детали, т. е. скелет детали выполнен из стали для обеспечения жесткости, а все тело — из пластмассы (например, металлополимерные зубчатые колеса, зубчатые колеса из капрона и т. п.). Применяют комбинированные детали, например, легкий сплав, а внутри стальная или чугунная вставка. Для повышения прочности деталей, с точки зрения чувствительности к концентрации напряжений, перспективно применение волокнистых металлических материалов. Они представляют собой композиции из высокопрочных волокон в мягкой основе (матрице).

Основную нагрузку воспринимают волокна, а матрица обеспечивает их равномерную нагрузку. Такие материалы повышают прочность деталей по сравнению с деталями из металлов почти в десять раз.

Волокна для композитных материалов получают различными методами:

1) механическими (вытягиванием тонкой проволоки, разрезанием фольги и др.);

2) из расплавленных металлов, пропуская через сопла, вытягивая из расплавленной капли и др.;

3) химическими (выращивание нитевидных кристаллов водородным восстановлением галоидных солей металлов) и др.

**Фелт-металл** — металлический войлок, который получают войлокованием металлических волокон, прессованием для получения надлежащей плотности и спеканием для сцепления в местах контакта.

Фелт-металлы применяют в фильтрах, вибропоглотителях, звукоизоляторах. Возможно их применение в тепловых экранах и изоляторах, для подшипников скольжения и других деталей.

Для деталей машин широко применяют металлокерамические и графитовые материалы.

*Металлокерамические материалы* изготавливают из металлокерамических порошков прессованием под высоким давлением и последующим спеканием при высокой температуре. Металлокерамические материалы используют как антифрикционные подшипниковые и фрикционные тормозные. Современные фрикционные металлокерамические материалы содержат в качестве основы железо или медь и компоненты, служащие смазкой (графит, свинец и др.), повышающие трение (асбест, кварцевый песок и др.). Металлокерамику наносят на стальные диски или колодки и соединяют путем спекания под давлением. Износостойкость металлокерамических поршневых колец близка к хромовому покрытию и в 2—2,5 раза выше чугунных.

*Графитовые материалы* применяют как антифрикционные в уплотнениях и подшипниках скольжения.

В последние десятилетия наблюдается рост производства и применения пластических масс или пластмасс.

Существуют следующие *преимущества применения пластмасс*:

– ресурсы сырья для изготовления большинства видов пластмасс практически неограничены;

– капитальные вложения для создания мощностей по производству пластмасс намного меньше, чем по производству металла, сроки освоения также короче (1 т пластмасс экономит 3—8 т стали или цветных металлов);

– трудоемкость изготовления пластмассовых изделий в 7—10 раз ниже, чем металлических (литьем, прессованием, выдавливанием); резания вообще не требуется;

– отходы в 5 раз меньше, чем у металлов.

*Недостатком* является невыгодность изготовления малыми сериями.

Пластмасса обладает следующими эксплуатационными свойствами:

– малой плотностью (вес машины в десятки раз меньше);  
– прочностью и жесткостью в широком диапазоне (на сжатие и изгиб пластмассовые детали работают лучше, чем металлические);

– высокой удельной прочностью, т. е. прочностью на единицу массы (стеклопластики намного прочнее титановых сплавов);

– высокой химической стойкостью (например, фторопласт 4); эффективностью и против коррозии;

– низкой электропроводностью (высокими диэлектрическими свойствами), что сыграло важнейшую роль в развитии производства пластмасс (в электротехнике они имеют широкое применение);

– высокими антифрикционными свойствами (например, фторопласт 4, полиформальдегиды и др.);

– высокими фрикционными свойствами ряда пластмасс (фенопласты с асбестовым наполнителем, пресскомпозиции на основе асбеста и каучуков и др.). Коэффициент трения составит 0,5—0,8;

– значительным внутренним трением, в силу чего детали из пластмасс характеризуются бесшумной работой и повышенной виброустойчивостью;

– прозрачностью и бесцветностью (оргстекло имеет хорошие оптические свойства, пластичность);

– низкой теплопроводностью (в 500—600 раз ниже, чем у металлов). Это свойство очень выгодно для теплоизоляции паропроводов, котлов, кабин автомобилей, строительных и дорожных машин;

– красивым внешним видом, гладкой блестящей поверхностью, возможностью получения любой окраски с помощью специальных красящих добавок, поэтому детали из пластмасс не требуют покраски.

*Недостатками* пластмасс являются:

- низкая теплостойкость (60—200°C). Однако фторопласты выдерживают температуру 300—350°C, а некоторые — 550—650°C;
- холодная ползучесть, т. е. медленное пластическое течение даже при напряжениях, существенно ниже предельных. Это затрудняет применение пластмасс для деталей высокой точности;
- старение, т. е. изменение первоначальных химических свойств с течением времени под действием повышенной или пониженной температуры, света, влажности и т. д. В большинстве случаев механические характеристики снижаются в пределах 15—30%;
- повышенный коэффициент линейного расширения. Он больше, чем у стали (в среднем в 5—10 раз).

*По назначению* пластмассы можно разделить на следующие группы:

- 1) конструкционные (в том числе высокой, средней и низкой прочности), теплостойкие, декоративно-отделочные и облицовочные;
- 2) фрикционные и антифрикционные;
- 3) электротехнические;
- 4) звуко- и теплоизоляционные;
- 5) антикоррозионные и стойкие к агрессивным средам.

Изготавливают заготовки из пластмассы в виде листов, прутков, труб, пресс-порошков и готовых изделий.

## **Выход из строя деталей машин (отказы)**

### **14.2 по критерию прочности**

.....

Детали машин могут выходить из строя в результате:

- 1) *усталостных разрушений*, которые возникают при переменных нагрузках. В зависимости от напряженных состояний происходят общие усталостные разрушения и поверхностные разрушения. Усталость ограничивает срок службы деталей машин, если переменные напряжения выше некоторого уровня, который при стационарном нагружении характеризуется пределом выносливости. Предел выносливости может отсутствовать, и разрушение может произойти после большого числа циклов нагружений при действии коррозии, высоких температур, а также при контактных нагружениях

закаленных до высокой твердости сталей (и в некоторых других особых случаях). Усталость приводит к внезапному разрушению после развития усталостной трещины до величины, при которой статическая прочность остаточного сечения оказывается исчерпанной. Число разрушений от усталости деталей машин довольно значительно. Разрушению от усталости подвергаются зубья зубчатых колес, валы и оси, штоки, подшипники качения и скольжения, пружины, болты и станины кузнечно-прессовых машин, металлические конструкции подъемно-транспортных машин и другие детали;

2) *пластических деформаций*, которые наблюдаются при перегрузках в деталях из вязких материалов (искривление валов и осей, вытяжки болтов при монтаже, осадка пружин, выдавливание ямок на дорожках качения подшипников, направляющих, обгонных муфт, шпоночных канавок, шлицев);

3) *ползучести*, т. е. процесса малой непрерывной пластической деформации при длительном нагружении. В основном у металлических деталей проявляется ползучесть при высоких температурах (детали паровых и газовых турбин, реактивных двигателей, паровых котлов нефтеперегонной температуры). Ползучесть лопаток и дисков турбин может привести к выборке радиальных зазоров между лопатками и корпусом, затем — к разрушению машины.

Ползучесть пластмасс резко уменьшает температурный диапазон их применения. Холодная ползучесть ограничивает возможность использования пластмасс для точных деталей;

4) *хрупких разрушений*, которые наблюдаются в условиях низких температур, большой остаточной напряженности, ударных нагрузок на детали из маловязких материалов при значительной концентрации напряжений, теплового охрупчивания, радиационного охрупчивания (детали машин, работающие в северных и космических условиях, сложные отливки, инструмент, чугунные и другие отливки при аварийных, ударных перегрузках и т. д.).

Усталостные разрушения (трещины) зарождаются обычно в зонах концентрации напряжений. Случаи аварий из-за резкой концентрации напряжений наблюдаются до сих пор. Концентрация напряжений может вызываться местным приложением нагрузки, формой детали, неоднородностью материала (например, валы и оси — переходы, галтели, ступени, канавки и т. п.); зубчатые колеса (основания зубьев); сварные соединения (околосварная зона и т. п.);

5) *упрочнения деталей машин*. Механические характеристики неупрочненных металлических материалов далеки от требований современного машиностроения, а эффективность упрочнений настолько велика, что все детали, подчиняющиеся критериям прочности и износа, должны упрочняться.

Большинство деталей машин подвержено изгибу и кручению, при которых напряжение растет в направлении к поверхности, где расположены основные источники концентрации напряжений (от формы и запрессовок), шероховатости поверхности, повышающие напряжения в тонком слое в 2—3 раза. На поверхности действуют контактные напряжения. Изнашиваются поверхностные слои деталей. Разрушение деталей, как правило, начинается с поверхности. Повышение прочности материала свыше 150 МПа становится малоэффективным. Все это указывает на необходимость поверхностных упрочнений.

Эффект поверхностного упрочнения складывается из собственного упрочнения поверхностного слоя и создания в поверхностном слое сжимающих напряжений.

Применяют поверхностные упрочнения следующих видов:

1) механические (обкатка роликами и шариками, чеканка, ротационно-ударный наклеп шариками, дробеструйный наклеп, гидродробеструйный наклеп и др.);

2) термические (закалка с нагревом токами высокой частоты и кислородноацетиленовым пламенем);

3) химико-термические (цементация с закалкой, азотирование, цианирование, нитроцементация);

4) термомеханические.

Наиболее технологически простыми и весьма эффективными являются *механические упрочнения*, т. е. упрочнения поверхностным пластическим деформированием. Технологические достоинства этих упрочнений — малая трудоемкость, отсутствие необходимости возить детали в термический цех и нарушать поток в механическом цеху, отсутствие окалины и т. д.

Поверхностное пластическое упрочнение применяется для деталей из стали, чугуна, алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, латуни, бронзы, твердых сплавов и др. Упрочнению подвергаются и стальные детали, закаленные до высокой твердости и азотированные.

Поверхностным пластическим упрочнением удастся обеспечить прочность деталей из менее дорогих металлических материалов,

например, избежать применения высоколегированных сталей высокой прокаливаемости.

В результате упрочнения предел выносливости типичных для машиностроения деталей сложных форм повышается до двух раз, а в условиях особо резкой концентрации напряжений — до трех.

Упрочнению подвергают наружные и внутренние поверхности вращения, плоскости и фасонные поверхности деталей.

*Обкатка роликами* особенно удобна для тел вращения. Она обычно осуществляется на станках токарного типа с простейшими приспособлениями, а в крупносерийном производстве — на специальных станках.

Глубину упрочненного слоя  $a$  выбирают от 2 до 10% от радиуса упрочняемой детали. Потребная сила прижатия ролика (шарика)  $P \approx 2 a^2 \cdot \sigma_T$ , где  $\sigma_T$  — предел текучести упрочняемой стали. Обкатка обычно производится со скоростью 20—30 м · мин<sup>-1</sup>. При более высоких скоростях возможно некоторое снижение глубины упрочнения.

Обкаткой роликами упрочняют оси, валы, в том числе коленчатые, роторы генераторов, колонны прессов, плунжеры, кольца подшипников и др. Обкатка повышает предел выносливости валов на гладких участках на 20—40%, в подступенчатых областях — на 80—100%, в галтелях на — 60—80%, сварных валов — в 2 раза, резьбы в 2—3 раза. Обкатка коленчатых валов из высокопрочного чугуна дизелей обеспечивает упрочнение в 1,8—1,9 раза.

Для деталей, подверженных большим переменным напряжениям и изнашиванию, можно применять комбинированное упрочнение — азотирование и обкатку роликами. При этом прочность повышается почти в два раза.

*Чеканка* осуществляется частыми ударами, обеспечивает такое же упрочнение, как обкатка роликами, но без создания больших статических сил сжатия. Применяют пневматические, пружинно-кулачковые, чеканочные приспособления, зажимаемые в суппорте токарных станков. Чеканку преимущественно применяют для сварных соединений и в тяжелом машиностроении.

*Дробеструйный наклеп*, осуществляемый потоками дроби на дробеметных машинах, позволяет упрочнять детали сложных форм любой твердости. Глубина наклепанного слоя составляет 0,5—0,7 мм. Преимущественно применяют стальную дробь (реже чугунную литейную) диаметром 0,6—2,0 мм. Скорость дроби — 70—90 м · с<sup>-1</sup>, время обдува обычно составляет 0,5—2 мин.

Дробеструйный наклеп широко применяют для пружин, рессор, зубчатых колес, шатунов. Ресурс этих деталей повышается почти в 10 раз.

*Ротационно-ударный наклеп шариками* осуществляют с помощью вращающихся оправок (упрочнителей), в профильных канавках которых помещают шарики. При встрече с упрочняемой поверхностью шарики утапливаются в пределах радиального зазора. Наклеп этим способом применяют для тонкостенных оболочек, не допускающих больших усилий.

Применяют также ряд других методов поверхностного пластического упрочнения, к числу которых относятся:

- *гидродробеструйная обработка* воздействием потока дробы в минеральном масле с добавкой поверхностно-активных веществ;
- *ультразвуковое упрочнение* воздействием на упрочняющую поверхность через сферический инструмент или шарик;
- *упрочнение взрывом*, которое применяется для тяжелых деталей, обеспечивает деформирование слоя металла на глубину 40—50 мм.

Эффективно пластическое поверхностное упрочнение зубьев зубчатых колес, особенно в сочетании с закалкой токами высокой частоты (ТВЧ). Предел выносливости зубьев повышается в 1,6—1,9 раза, износостойкость — в 1,5—1,8 раза.

Наклеп эффективен при условии, что детали не подвергаются перегрузкам выше предела текучести.

Эффективно *алмазное выглаживание поверхностей*. Этот процесс обеспечивает высокое качество поверхности, повышение ресурса и уменьшение его разброса по контактной прочности деталей, работающих в условиях качения.

Основными средствами упрочнения, получившими широкое распространение, являются *термическая, химико-термическая обработки и нанесение поверхностных покрытий*.

*Закалка* повышает прочность углеродистых сталей в 1,5—2 раза, а легированных в 2—3 раза. Наиболее технологически удобна поверхностная закалка с нагревом ТВЧ. Закалка может осуществляться в механическом цехе без нарушения потока, при этом отпадают операции транспортирования деталей в термический цех и обратно.

*Цементация* (насыщение поверхности деталей углеродом) с последующей закалкой обеспечивает большую твердость (HRC 58—63), высокую несущую способность поверхностных слоев и прочность деталей. В условиях массового производства целесообразна газовая

цементация. Цементация и закалка зубьев повышают предел выносливости на изгиб в 3 раза по сравнению с закалкой токами высокой частоты.

*Азотирование* (насыщение азотом) обеспечивает особо высокую поверхностную твердость, износостойкость и сопротивление заеданию, а также значительное повышение прочности. Для азотируемых деталей применяют молибденовые стали 38ХМЮА и др. Азотирование сталей, не содержащих алюминия (40ХФА, ЧХМНА, 40Х и др.), приводит к меньшей твердости, но зато к большей вязкости. Толщина азотированного слоя обычно составляет 0,1—0,6 мм.

*Цианирование* (насыщение углеродом и азотом в ваннах, содержащих цианистые соли) применяется для деталей (в частности, зубчатых колес) из среднеуглеродистых сталей. Цианирование дешевле цементации и азотирования. Упрочненный слой составляет 0,1—0,3 мм.

*Нитроцементация* (насыщение углеродом и азотом в газовой среде) характеризуется высокой производительностью. Скорость нитроцементации составляет 0,1 мм/ч. В автомобильной промышленности нитроцементация стала основным средством упрочнения зубчатых колес.

*Термомеханическая обработка* (термообработка в напряженном состоянии). Прочность легированных сталей повышается в 5—6 раз.

Процессы изнашивания и коррозии являются основными причинами выхода из строя деталей машин и металлоконструкций.

Известно, что в результате естественного изнашивания выходит из строя до 70% деталей и их соединений. Так, в химической промышленности стран СНГ ежегодно приходит в негодность свыше 200 тыс. т оборудования и элементов трубопроводов. Общая сумма коррозионных потерь в США, по минимальным оценкам, составляет около 70 млрд дол. в год, т. е. 4,2% валового национального продукта.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что для повышения износо- и коррозионной стойкости деталей и металлоконструкций необходимо применять *защитные покрытия*.

Наиболее распространены в промышленности следующие защитные покрытия:

- электролитическое металлопокрытие (никелирование, хромирование, цинкование и т. п.);
- химическое металлопокрытие (латунь, кадмий, медь, золото, никель, олово), известное еще с древнейших времен;
- горячее металлопокрытие (горячее алюминирование, горячее цинкование);

- диффузионное насыщение (металлом или сплавом при высокой температуре);
- сульфидирование (диффузия поверхности металлов свободной серой при нагреве до 600°C);
- вакуумное осаждение (путем осаждения атомов и молекул металла на поверхность изделия);
- эмалирование (нанесение стеклянной глазури);
- наплавка (путем плавления присадочного материала — кислородно-ацетиленовая, электрическая, плазменная, газопламенная и др.);
- плакирование (соединение двух или большего числа металлических слоев способом прокатки, сварки, взрывом или литьем);
- насыщение (образование на поверхности изделия покрытий из нагретых до плавления частиц расплавляемого материала с использованием теплоты горючей смеси или теплоты дугового разряда в газовых средах);
- лазерная технология получения покрытий (лазерный нагрев до плавления основного и присадочного материала).

## 15 ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ

### 15.1 Общие сведения

С позиции надежности предельное состояние конструкции по статической прочности должно характеризоваться допустимыми и недопустимыми состояниями. Граница между этими состояниями зависит от несущей способности отдельных элементов конструкций или предельно допустимых перемещений (ускорений) элементов, определяемых жесткостью конструкций и ее элементов и внешним нагружением.

В процессе нагружения материал конструкции может находиться в упругом состоянии, пластическом или состоянии разрушения. Условно за границы этих состояний обычно принимают предел упругости  $\sigma_p$ , предел текучести  $\sigma_T$  и предел прочности  $\sigma_B$  (рис. 15.1). Для хрупких материалов, у которых

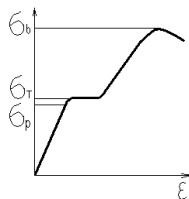


Рисунок 15.1 —  
Кривая прочности  
материала

площадка текучести практически отсутствует, критерии пластичности одновременно являются и критериями прочности.

У пластичных материалов критерии перехода в пластическое состояние и в состояние

разрушения зависят от вида напряженного состояния и физико-технических свойств материала. Разрушение материала может происходить либо путем отрыва (хрупкое разрушение), либо среза (пластичное разрушение).

Несущая способность конструкции зависит также от температурных режимов и длительности воздействия силовых и тепловых нагрузок. Длительность воздействия таких нагрузок сопровождается явлениями кратковременной или длительной ползучести материала. Для некоторых конструкций (например, авиационных) к изменению физических свойств материала могут приводить акустические нагрузки (особенно ультразвукового диапазона).

При циклическом нагружении разрушение может происходить даже при небольшом числе циклов, если амплитуда напряжения будет выходить за предел упругости материала. При длительном нагружении причиной разрушения может быть усталость материала при амплитуде напряжений, меньшей предела упругости.

Исследования показали, что при случайном изменении нагружений имеет место более интенсивное накопление повреждений в материале, чем при циклическом нагружении.

Условие прочности любой  $j$ -й части конструкции может быть записано в виде вероятности одновременного выполнения следующих неравенств:

$$P_j(t) = \begin{cases} \varphi_{ijп}(t) = [R_{ijп}(t) - H_{ij}(t)] > 0, \\ \varphi_{ijy}(t) = [R_{ijy}(t) - H_{ij}(t)] > 0, \\ \varphi_{ijэ}(t) = [R_{ijэ}(t) - H_{ij}(t)] > 0, \end{cases} \quad (15.1)$$

где  $R_{ijп}$ ,  $R_{ijy}$ ,  $R_{ijэ}$  — функции несущей способности  $j$ -й части конструкции соответственно по статической прочности материала, по устойчивости равновесных форм, по относительным перемещениям в  $i$ -м режиме эксплуатации;

$H_i(t)$  — функции внешнего нагружения.

При условии, что события  $\Pi$ ,  $У$  и  $\mathcal{E}$  несовместны, вероятность отказа по прочности будет равна

$$Q\{\phi_{ij}(t) < 0\} = Q\{\phi_{ij\pi}(t) < 0\} + Q\{\phi_{ijy}(t) < 0\} + Q\{\phi_{ij\mathcal{E}}(t)\}. \quad (15.2)$$

**Хрупким разрушением** обычно называют внезапное разделение напряженного тела на две или более частей без какой-либо заметной неупругой деформации. Этот вид разрушения сопровождается минимальным поглощением энергии. Причиной таких разрушений являются субмикроскопические трещины с атомарно острыми концами, где концентрация напряжений превышает способность тела сопротивляться им. При скоростях хрупких разрушений, близких к скорости звука в той же среде, процесс разрушения становится самоподдерживающимся.

Гриффитс вывел условие хрупкого разрушения, согласно которому разрушение происходит, когда при бесконечно малом удлинении трещины выделяется больше упругой энергии, чем это требуется для образования новых трещин.

Напряжение разрушения  $\sigma_p$ , согласно уравнению Гриффитса, равно

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{2\alpha E}{\pi C}}, \quad (15.3)$$

где  $C$  — половина длины микроскопической трещины с радиусом кривизны в вершине порядка межатомного расстояния;

$E$  — модуль упругости;

$\alpha$  — поверхностная энергия, равная приблизительно  $10^3$  эрг /  $\text{см}^2$  (для хрупких тел).

При наличии очень острой и длинной трещины макроскопическая прочность определяется по уравнению Орована

$$\sigma_p = \frac{E}{20} \sqrt{\frac{\alpha}{C}}, \quad (15.4)$$

где  $\alpha$  — радиус кривизны трещины.

Если трещина имеет форму диска или монеты, то

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\pi \alpha E}{2(1-\nu^2)C}}, \quad (15.5)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

При оценке прочностной надежности элементов технологических систем на этапе проектирования встает задача об определении вероятности разрушения детали в результате того, что эксплуатационные нагрузки превзойдут по величине допустимый предел нагруженности в опасном сечении, обусловленный, например, величиной предела прочности.

Эксплуатационные нагрузки ( $S$ ) и прочностные характеристики материала ( $R$ ) будем считать случайными величинами, имеющими функции плотности вероятностей  $f_1(S)$  и  $f_2(r)$ .

Условие неразрушения записывается в виде

$$U = R - S > 0. \quad (15.6)$$

Функция плотности случайной величины  $U = R - S$  находится путем компонирования функций  $f_1(S)$  и  $f_2(R)$

$$f_3(U) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(S) f_2(S+U) dS \quad \text{или} \quad f_3(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(r-u) f_2(r) dr. \quad (15.7)$$

Так как на этапе проектирования функции  $f_1(S)$  и  $f_2(r)$  могут быть неизвестны, то для получения гарантированных оценок их целесообразно представлять функциями равной вероятности, равномерно убывающей вероятности и др.

## 15.2 Гипотезы усталостных разрушений

**Усталость** — процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений.

Зависимость между величиной напряжения и числом циклов до разрушения характеризуется кривой Велера (рис. 15.2).

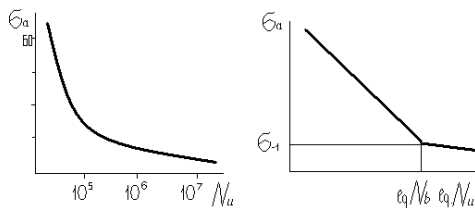


Рисунок 15.2 — Кривая Велера

Этот вид разрушения, несмотря на то что является наиболее распространенным, еще недостаточно изучен. К настоящему времени в известной степени разработаны вопросы влияния на усталостную долговечность размеров деталей, отверстий, выточек и других особенностей формы деталей.

Наименее изученными являются вопросы влияния на усталость дефектов, встречающихся в литых деталях (раковин, включений, дефектов термообработки, сварки, штамповки и т. д.). Эти дефекты определяют работоспособность деталей, в то же время нет обоснованных рекомендаций, в каких случаях литые детали с теми или иными дефектами следует отбраковывать, а в каких — не стоит. Для крупногабаритных литых деталей вопрос об отбраковке или приемке деталей имеет большое экономическое значение, поэтому в данном случае следует учитывать, влияют ли на долговечность имеющиеся дефекты и в какой степени.

Существуют несколько гипотез усталостного разрушения. Рассмотрим некоторые из них.

*Гипотеза упрочнения и разупрочнения* была предложена профессором И. А. Одином. Автором установлено, что при циклических напряжениях в металлах одновременно происходит явления упрочнения и разупрочнения. Для объяснения процесса усталости он рассмотрел особенности петель упругого и пластического гистерезисов.

При нагружении металла в пределах, не превышающих упругой деформации, линия нагружения не совпадает с линией разрушения (рис. 15.3).

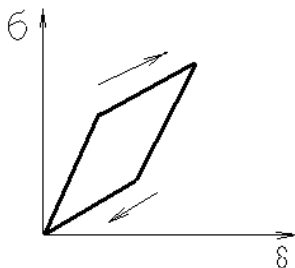


Рисунок 15.3 — Петля упругого гистерезиса при одностороннем нагружении

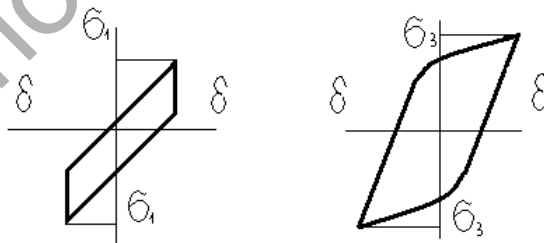
Это несовпадение, называемое упругим гистерезисом, показывает, что работа деформации, затрачиваемая при нагружении образца, больше работы деформации, возвращающейся при его разрушении, поэтому считают, что упругий гистерезис обуславливается некоторым запаздыванием деформации в первые периоды нагружения и разгрузки (рис. 15.4.)

Для пластичного гистерезиса характерно отставание напряжения от деформации (см. рис. 15.4.). Ширина петли гистерезиса характеризует циклическую вязкость, т. е. способность металла поглощать энергию в необратимой форме при действии циклически повторяющихся односторонних или знакопеременных напряжений.

При действии напряжений выше предела усталости с нарастанием числа циклов петля гистерезиса растет до точки разрушения, как показано на рисунке 15.4 (при напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ), поэтому И. А. Одинг считает, что при высоких напряжениях, когда ширина петли гистерезиса с нарастанием числа циклов увеличивается, фактор разупрочнения превалирует над упрочнением.

Согласно теории И. А. Одинга, в процессе накопления циклов нагружений эффективность действия упрочнения и разупрочнения меняется, и в зависимости от суммарного действия величина пластического гистерезиса стабилизируется или возрастает, что приводит к разрушению.

На основании этой теории удалось объяснить явление тренировки металла при напряжениях, близких к пределу усталости; показать связь между величинами пределов усталости при растяжении,



*a* — для упругого гистерезиса;  
*b* — для пластичного гистерезиса

Рисунок 15.4 — Изменение формы петли гистерезиса

сжатии, изгибе и кручении; установить зависимость между пределом усталости при одноосном нагружении и сложном напряжении, а также в условиях асимметричного цикла; вывести зависимость между пределом усталости гладких образцов и образцов с надрезом и объяснить природу влияния концентрации напряжений.

Начало исследованиям по статистической теории прочности положено работами В. Вейбулла и Н. Н. Афанасьева. Появление этой теории было вызвано необходимостью объяснить разброс экспериментальных данных при испытании большого количества образцов. Ученые исходили из того, что реальный металл состоит из отдельных кристаллов, имеющих внутренние напряжения, не являющихся однородной массой. Механические свойства отдельных зерен в направлении действующей силы различны вследствие наличия химической неоднородности напряженного состояния.

Для получения количественных оценок Н. Н. Афанасьев принял, что либо все зерна имеют в направлении действующей силы одинаковый предел текучести, но различно напряжены, либо все зерна одинаково напряжены, но имеют различный предел текучести. Усталостная трещина возникает в случае, когда амплитуда приведенного напряжения для данного зерна достигает сопротивления отрыва. Расчет предела усталости сводится к определению вероятности нахождения в металле одного или нескольких зерен, нагруженных до напряжения, равного или выше критического.

Статистическая теория позволяет учесть влияние многих факторов на усталостную долговечность, и, прежде всего, масштабного фактора.

Значительное распространение получили с 1932 г. дислокационная теория и связанная с ней теория вакантных мест в кристаллической решетке. Вначале они применялись для объяснения явления пластической деформации металла, а затем для рассмотрения процессов, вызывающих постепенное длительное разрушение, в том числе и в условиях циклического нагружения.

Разрушение металлов при циклическом нагружении рассматривается И. А. Одинггом как процесс образования вакансий и скопления их в колонии. Эти представления позволили И. А. Одингу найти зависимость между напряжением, числом циклов до разрушения и пределом выносливости:

$$N_i = K_x (\sigma_i - \sigma_{-1})^{-m}, \quad (15.8)$$

где  $N_i$  — число циклов до разрушения;

$\sigma_i$  — действующее напряжение;

$\sigma_{-1}$  — предел выносливости;

$K_x, m$  — постоянные коэффициенты.

Аналогичное уравнение получено эмпирическим путем Вейбуллом и положено в основу одного из методов ускоренных испытаний.

Усталостное разрушение В. П. Кирпичев объясняет с точки зрения поликристаллической неоднородности строения металла. Конструкционные стали и другие сплавы представляют собой мелкокристаллический конгломерат, кристаллы которого имеют случайную ориентировку. В зависимости от ориентировки кристаллографических осей кристаллиты имеют упругие различные свойства и различную прочность в различных направлениях, т. е. обладают анизотропией. При приложении внешних нагрузок возникают пластические деформации отдельных кристаллов даже при небольшом числе циклов. Одновременно с этим пластические деформации в ряде материалов вызывают структурные превращения.

При термодинамическом представлении о разрушении твердого тела от усталости величина удельной внутренней энергии, накопленной материалом до разрушения и определяющей разрушение, определяется зависимостью

$$u = u_0 + D_{\Sigma} - q_{\delta}, \quad (15.9)$$

где  $u_0$  — уровень внутренней энергии материала в исходном состоянии;

$D_{\Sigma}$  — суммарная удельная, необратимо поглощенная материалом энергия циклических деформаций;

$q_{\delta}$  — суммарная удельная тепловая энергия, выделенная деформируемым объемом в результате саморазогрева и рассеяния в окружающую среду за счет теплообмена.

Разрушение наступает, когда внутренняя накопленная энергия больше критической величины  $u_{кр}$ , которая является константой для каждого материала.

В практических расчетах на усталость чаще всего используется линейная теория накопления усталостных повреждений Майнера

$$a = \sum \frac{m(\sigma_k)}{N(\sigma_k)}, \quad (15.10)$$

где  $m$  — число циклов при амплитуде напряжений  $\sigma_k$ ;

$N$  — число циклов, соответствующих моменту возникновения трещины при той же амплитуде.

Величина  $a$ , как правило, зависит от характера изменения амплитуд напряжений и изменяется от 0,3 до 2. Если происходит постепенное увеличение амплитуд  $\sigma_k$ , то  $a > 1$ , что объясняется упрочнением материала. Если же циклическое нагружение начинают с больших амплитуд напряжений  $\sigma_k$  с последующим их постепенным уменьшением, то  $a < 1$ . При случайном изменении амплитуд напряжений величина  $D$  несущественно отличается от единицы.

## Оценка усталостных характеристик в зависимости от скорости

### 15.3 распространения трещины

Усталостные трещины появляются без заметной пластической деформации. Профиль излома состоит из двух отчетливых областей: первая — гладкая и бархатистая — является усталостной зоной, вторая — грубошероховатая и кристаллическая — зоной мгновенного разрушения. Первая область образуется в течение многих циклов. В результате действия переменных нагрузок поверхности усталостной трещины сглаживаются из-за трения между двумя поверхностями трещины. Та часть материала, которая разрушается мгновенно, имеет грубую зернистую поверхность, так как износ между поверхностями трещины в данном случае отсутствует. Для деталей, изготовленных из чугуна и многих цветных металлов, усталостная зона имеет вид грубой кристаллической поверхности, а зона мгновенного действия — гладкую поверхность.

Усталостная трещина всегда возникает в той точке металла, где отношение местного напряжения к пределу выносливости металла самое низкое. Обычно эти точки находятся на поверхности детали. Объясняется это тем, что прочность металла по его поперечному сечению сравнительно одинакова, а максимальное напряжение при кручении или изгибе находится в крайних волокнах. Иная картина наблюдается при наличии трещин или других металлургических дефектов внутри материала. Эти дефекты приводят к понижению прочности материала в окрестности дефекта. В результате внутри

детали развивается трещина, которая распространяется как в направлении к поверхности, так и к центру детали.

Изучение механики усталостных трещин началось после внедрения в практику исследований растрового электронного микроскопа, разрешающая способность которого позволяет четко разграничить стадии возникновения и развития трещин, начиная с момента излома микроструктуры. На этом микроскопе удается наблюдать начало процесса концентрации рассеянных микротрещин и перерастания их в одну конечную трещину критического размера, которая под воздействием приложенных усилий после медленного роста переходит в катастрофическое состояние. Однако такой процесс не носит внезапного характера, он состоит из последовательного объединения соседних микротрещин, уменьшения числа микротрещин, размер которых увеличивается, и ускорения роста размеров одной из трещин. Такая трещина называется конечной и именно она приводит к усталостному разрушению, поэтому полное число циклов до разрушения составит

$$N = N_0 + N_c, \quad (15.11)$$

где  $N$  — число циклов до разрушения;

$N_0$  — число циклов на стадии образования трещины;

$N_c$  — число циклов, необходимых для развития критической трещины.

## Вероятностные методы расчета

### 15.4 усталостных характеристик

Расчеты на прочность чаще всего сводятся к установлению коэффициентов запаса прочности. Если эксплуатационные напряжения изменяются по асимметричному циклу с постоянными во времени значениями амплитуды и среднего напряжения цикла, расчеты проводятся по формулам

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma}{\varepsilon_\sigma} \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}; \quad n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\frac{K_\tau}{\varepsilon_\tau} \tau_a + \psi_\tau \tau_m}; \quad n = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}}, \quad (15.12)$$

где  $n$  — коэффициент запаса прочности;  
 $n_\sigma, n_\tau$  — частные коэффициенты запаса прочности по нормальным и касательным напряжениям;  
 $\sigma_{-1}, \tau_{-1}$  — пределы выносливости гладких полированных образцов диаметром 7,5 мм по ГОСТ 2860-65;  
 $K_\sigma, K_\tau$  — эффективные коэффициенты концентрации напряжений;  
 $\varepsilon_\sigma, \varepsilon_\tau$  — коэффициенты влияния абсолютных размеров поперечного сечения (масштабный фактор);  
 $\sigma_a, \tau_a$  — амплитуда напряжений цикла;  
 $\varphi_\sigma, \varphi_\tau$  — коэффициенты влияния асимметрии цикла.  
 Если амплитуды напряжений являются случайными величинами, вводится эквивалентное напряжение

$$\sigma_{\text{экв}} = m \sqrt{\frac{\lambda}{N_0 a_p} \sum_{i=1}^r \sigma_{ai}^m v_{ib}} = m \sqrt{\frac{\lambda v_b}{N_0 a_p} \sum_{i=1}^r \sigma_{\lambda i}^m i}, \quad (15.13)$$

где  $m, N_0$  — параметры кривой усталости;  
 $\lambda$  — число блоков нагружения за весь срок службы детали;  
 $a_p$  — параметр, корректирующий линейную гипотезу суммирования усталостных повреждений;  
 $r$  — число ступеней амплитуд напряжений в блоке нагружения;  
 $\sigma_a$  — амплитуда напряжений  $i$ -го уровня в блоке нагружения;  
 $v_{ib} = v_{bti}$  — число циклов, соответствующих амплитуде  $\sigma_{ai}$  в одном блоке нагружения при замене непрерывного распределения амплитуд ступенчатым;  
 $v_b$  — общее число циклов в одном блоке нагружения.

При этом кривая усталости задана формулой

$$\sigma_{pi}^m N_i = \sigma_{-1д}^m N_0, \quad (15.14)$$

где  $\sigma_{-1д}$  — предел выносливости реальной детали, выраженный в номинальных напряжениях;  
 $t_i = v_{ib} / v_b$  — относительное число циклов в блоке нагружения, соответствующее амплитуде напряжения  $i$ -го уровня.

**Под блоком нагружения** понимается совокупность последовательных значений переменных во времени напряжений, которые возникают в детали за определенный период эксплуатации. Запас прочности в этом случае берется равным

$$n = \frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_{\text{экв}}}. \quad (15.15)$$

Долговечность детали определяется как суммарное число циклов до разрушения

$$N_{\Sigma} = \frac{a_p \sigma_{-1д}^m N_0}{\sum \sigma_{ai}^m t_i}. \quad (15.16)$$

Формула (15.16) основана на гипотезе линейного суммирования повреждений.

Так как предел выносливости и амплитуда напряжений являются случайными величинами, условие разрушения запишется в виде

$$\sigma_{-1д} - \sigma_a < 0. \quad (15.17)$$

Предложен и ряд других формул, отличающихся несколько большей сложностью за счет введения дополнительных факторов.

## Оценка усталостных характеристик

### 15.5 ускоренными методами испытаний

В настоящее время существует несколько принципиальных различных подходов к оценке усталостных характеристик ускоренными методами. Остановимся только на двух методах, получивших наиболее широкое распространение.

#### Метод линейного увеличения нагрузки (метод Про)

При данном методе образцы испытываются при повторно-переменной нагрузке, линейно увеличивающейся во времени вплоть до разрушения

образца. Метод основан на экспериментально установленной Е. М. Про зависимости

$$\sigma_{\max} = k\alpha^m + \sigma_{-1}, \quad (15.18)$$

где  $\sigma_{\max}$  — величина напряжения, при котором произошло разрушение образца;

$\alpha$  — скорость возрастания нагрузки, характеризующая увеличение напряжения за цикл, кг · с / мм<sup>2</sup>·цикл;

$\sigma_{-1}$  — предел выносливости;

$k, m$  — постоянные коэффициенты.

Согласно Е. М. Про, принимают  $m = \frac{1}{2}$ . В этом случае выражение (15.18) принимает вид

$$\sigma_{\max} = k\sqrt{\alpha + \sigma_k}. \quad (15.19)$$

Для определения предела выносливости достаточно нанести результаты испытаний на график в координатах  $(\sigma_{\max}; \sqrt{\alpha})$  и соединить их прямой. Точка пересечения этой прямой с осью  $\sigma_{\max}$  (при абсциссе  $\sqrt{\alpha} = 0$ ) дает искомое значение  $\sigma_{-1}$ .

Графическое решение (рис. 15.5) путем проведения прямой через экспериментальные точки может дать большую ошибку, поэтому можно использовать способ наименьших квадратов, при котором величина  $\sigma_{-1}$  должна определяться из выражения

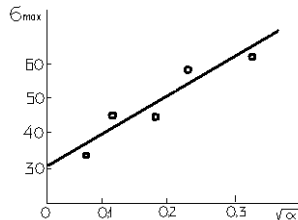


Рисунок 15.5 — Результаты испытаний по методу Про

$$\sigma_{-1} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{\max,i} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \sum_{i=1}^n \sqrt{\alpha_i} \sum_{i=1}^n (\sigma_{\max,i} \sqrt{\alpha_i})}{n \sum_{i=1}^n \alpha_i - \left( \sum_{i=1}^n \sqrt{\alpha_i} \right)^2}, \quad (15.20)$$

где  $n$  — число экспериментальных значений;

$\alpha_i$  — скорость изменения нагружения в  $i$ -м опыте;

$\sigma_{\max,i}$  — напряжение, при котором имело место разрушение образца.

Для повышения точности результатов обычно при каждом  $\sigma_i$  испытывают не менее трех-четырёх образцов, а за  $\sigma_{\max}$  принимают их медианное значение. Скорость возрастания напряжения  $\alpha$  обычно выбирают в диапазоне от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$  МПа, а начальный уровень напряжения обычно берут равным 0,6—0,8 от предполагаемого предела выносливости.

Однако практическое апробирование метода Про показало, что для многих материалов коэффициент  $m$  не равен  $\frac{1}{2}$ , а изменяется от 0,3 до 0,7. В этом случае вычисление величины  $\sigma_{-1}$  по формуле (15.19) сводится к определению по опытным данным трех неизвестных  $\sigma_{-1}$ ,  $k$ ,  $m$ .

В результате решение задачи сводится к определению  $\sigma_{-1}$  методом последовательных приближений, а затем —  $m$  методом наименьших квадратов.

### Метод ступенчато-возрастающих нагрузок (метод Локати)

В основу метода положена гипотеза Майнера о линейности накопления усталостных повреждений. Испытания проводятся путем ступенчатого увеличения напряжений. На первой ступени образец нагружают начальным напряжением  $\sigma_0$  и испытывают в течение  $n_0$  циклов. Величину  $\sigma_0$  принимают заведомо ниже предполагаемого предела усталости.

После приложения  $n_0$  циклов напряжение повышают на величину  $\Delta\sigma$  так, что  $\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma$ , при этом напряжении  $\sigma_1$  образец нагружают  $n_1$  циклами. Принимают  $n_1 = n_0$ , затем напряжение повышают еще на величину  $\Delta\sigma$  так, что  $\sigma_2 = \sigma_1 + \Delta\sigma$ , и нагружают  $n_2$  циклами  $n_2 = n_1 = n_0$ . Аналогичное увеличение напряжений продолжают до разрушения образца. Число циклов на последней ступени ( $n_m$ ) определяется временем разрушения образца и может быть меньшим  $n_0 = n_1 = \dots = n_{m-1}$ .

Сумму относительных повреждений принимают равной 1, т. е.

$$\sum_{i=1}^n \frac{n}{N_i} = \frac{n_0}{N_1} + \dots + \frac{n_i}{N_i} + \dots + \frac{n_m}{N_m} = 1, \quad (15.21)$$

где  $n_i$  — число циклов нагружения на  $i$ -й ступени при напряжении  $\sigma_i$ ;  
 $N_i$  — средняя усталостная долговечность при напряжении  $\sigma_i$ , т. е. число циклов нагружений, достаточное для разрушения образца при напряжении  $\sigma_i$ .

Для определения  $N_i$  в координатах  $N - \lg N$  строят три кривые усталости ( $A, B, C$ ) (рис. 15.6) с пределами выносливости  $\sigma_{-1}^A$ ,  $\sigma_{-1}^B$ ,  $\sigma_{-1}^C$ . При контрольных испытаниях за кривые  $A, B, C$  принимают теоретические кривые, соответствующие медианному значению усталостной долговечности и по  $\gamma$  и  $1 - \gamma$  уровням значимости. По этим кривым определяют значения числа циклов, соответствующих точке пересечения каждой кривой с уровнем заданных амплитуд напряжений  $\sigma_i$ . По полученным значениям вычисляют отношения  $n_i / N_i$  и  $\sum n_i / N_i$ . Затем строят график, на котором по оси абсцисс отложены  $\sigma_{-1}^A$ ,  $\sigma_{-1}^B$ ,  $\sigma_{-1}^C$ , а по оси ординат — соответствующие им значения  $\sum n_i / N_i$ . Путем графического интерполирования находят значение  $\sigma_{-1}$ , соответствующее  $\sum n_i / N_i = 1$ . Найденное значение принимают за искомую величину  $\sigma_{-1}$ .

В соответствии с ГОСТ 19.533-74 оптимальные интервалы начального напряжения задаются неравенствами  $1,0 \sigma_{-1}^{\text{ож}} < \sigma_0 < 1,2 \sigma_{-1}^{\text{ож}}$  — при изгибе и растяжении-сжатии;  $1,0 \tau_{-1}^{\text{ож}} < \tau_0 < 1,2 \tau_{-1}^{\text{ож}}$  — при кручении, где  $\sigma_{-1}^{\text{ож}}$ ,  $\tau_{-1}^{\text{ож}}$  — величины ожидаемого предела выносливости по соответствующему напряжению.

Оптимальные интервалы приращения напряжения  $\Delta\sigma$  или  $\Delta\tau$  задаются неравенствами  $0,05 \sigma_{-1}^{\text{ож}} < \Delta\sigma < 0,15 \sigma_{-1}^{\text{ож}}$  — при изгибе и растяжении-сжатии и  $0,05 \tau_{-1}^{\text{ож}} < \Delta\tau < 0,15 \tau_{-1}^{\text{ож}}$  — при кручении. Величину  $n_i$  определяют по формулам  $n_i = \Delta\sigma / \alpha$  и  $n_i = \Delta\tau / \alpha$  исходя из выбранных значений  $\Delta\sigma$  ( $\Delta\tau$ ) и оптимального значения средней скорости роста напряжения  $\alpha^{\text{опт}}$ . Если окажется, что  $n_i > 10^6$ , необходимо уменьшить значение  $\Delta\sigma$  ( $\Delta\tau$ ). Оптимальное значение средней скорости роста напряжений ( $\alpha^{\text{опт}}$ ) определяется по номограмме (рис. 15.7) в зависимости от выбранного значения  $\sigma_0 / \sigma_{-1}^{\text{ож}}$  или  $\tau_0 / \tau_{-1}^{\text{ож}}$ .

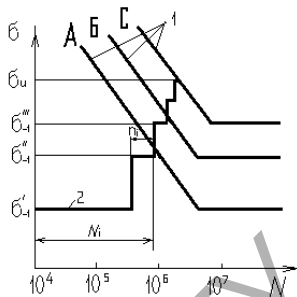


Рисунок 15.6 — Теоретические кривые усталости (1) и схема приложения нагрузки по методу Локати (2)

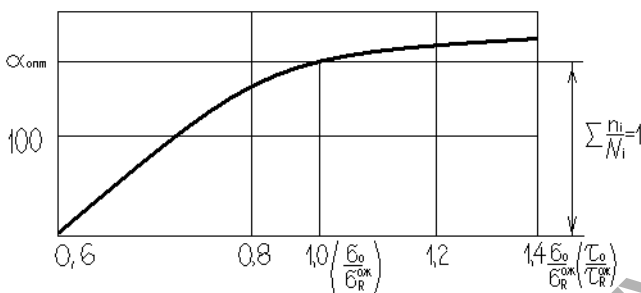


Рисунок 15.7 — Схема интерполирования для определения скорости роста напряжений при испытаниях по методу Локати

На оси абсцисс откладывают значение  $\sigma_0 / \sigma_{-1}^{ож}$  или  $\tau_0 / \tau_{-1}^{ож}$ , затем восстанавливают перпендикуляр до пересечения с линией  $\sum n_i / N_i = 1$ . От точки пересечения проводят линию, параллельную оси абсцисс, и на оси ординат находят искомое значение  $\alpha^{опт}$ .

## 16 НАДЕЖНОСТЬ ПО КРИТЕРИЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И МЕТОДЫ ЕЕ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

### 16.1 Износостойкость и методы ее оценки

**Износ** — один из основных видов разрушения деталей. Статистические данные показывают, что около 70% от общего количества отказов технических систем происходит из-за износа элементов машин и оборудования, поэтому повышение износостойкости деталей машин является одной из основных научно-технических проблем машиностроения.

**Под изнашиванием** понимается процесс постепенного изменения тела при трении, проявляющееся в отделении с поверхности трения материала и (или) его остаточной деформации.

**Под трением** понимается сопротивление относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним.

Для оценки износа используются показатели

$$I = \frac{\Delta V}{A_1 \Delta L} = \frac{\Delta h}{\Delta L}; \quad i = \frac{\Delta v}{A_r l}, \quad (16.1)$$

где  $I$  — интенсивность износа;  
 $\Delta V, \Delta h$  — объем и толщина слоя материала, истираемого на пути  $\Delta L$ ;  
 $\Delta L$  — путь трения;  
 $i$  — удельный износ;  
 $\Delta v$  — объем материала, удаленного с фактической площадки контакта  $A_r$  на пути  $\Delta l$ ;  
 $l$  — размер пятна фактического контакта, измеряемого в направлении скольжения.

Первопричиной процесса изнашивания является постоянное возникновение и нарушение фрикционных связей, которые имеют двойственную молекулярно-механическую природу.

Основными характеристиками, определяющими вид фрикционной связи, является отношение глубины внедрения (или величины сжатия) единичной неровности  $h$  к ее радиусу  $R$ , а также градиент механических свойств  $\frac{d\tau}{dh}$ , определяющий различие между прочностью адгезионной связи и прочностью нижележащих слоев.

Отделение элементарных частиц, т. е. износ, может происходить при различном числе взаимодействий микровыступов (циклов), что зависит от природы разрушения. Если разрушение в зоне пятна контакта связано с усталостью, то число циклов должно достигнуть критического значения  $n_{кр}$ , соответствующего пределу усталости материала.

При различных видах фрикционных связей (табл. 16.1) износ может возникать в результате следующих причин:

- 1) фрикционной усталости (I);
- 2) малоциклового фрикционной усталости (II);
- 3) микрорезания (III);
- 4) разрушения (в том числе усталостного) пленки (IV);
- 5) когезионного (адгезионного) отрыва материала при единичных актах взаимодействия (V).

Т а б л и ц а 16.1 — Основные виды фрикционных связей

Вид	Схема	Характер деформации	Число циклов	Условия осуществления
I		Упругое отгеснение материала	$n \geq n_{кр}$	$h / R < 0,01$ (а)
				$h / R < 0,001$ (б)
II		Пластическое отгеснение материала	$1 < n \leq n_{кр}$	$h / R < 0,1$ (в)
				$h / R < 0,3$ (г)
III		Микрорезание материала	$n = 1$	$h / R < 0,1$ (в)
				$h / R < 0,3$ (г)
IV		Разрушение пленки	$n \geq n_{кр}$	$d\tau / dh > 0$
V		Разрушение основного материала	$n = 1$	$d\tau / dh < 0$

При этом топография поверхностей (см. табл. 16.1) приводит к дискретности контакта, когда фактические пятна контакта возникают преимущественно на вершинах волн при деформации отдельных неровностей, поэтому различают три площади контакта:

- 1) номинальную (по ней рассчитывается давление на поверхности трения);
- 2) контурную (зона контакта по вершинам волн);
- 3) фактическую сумму элементарных площадок контакта, возникающих в результате деформаций отдельных неровностей.

При взаимном перемещении сопряженных поверхностей зоны контакта постоянно изменяются, а отдельные микронеровности подвергаются многократному нагружению, в результате чего возникают условия для усталостного разрушения поверхностного слоя.

Процесс изнашивания сопровождается характерными явлениями:

- 1) *возникновением высоких локальных температур*, что является одним из основных факторов, определяющих характер и интенсивность процесса разрушения поверхностных слоев.

Температура и градиент температуры ускоряют все химические процессы, уменьшают толщину смазочного слоя и приводят его к десорбции (удалению) и деструкции (разрушению), снижают механическую прочность материалов, вызывают внутренние напряжения, влияют на структурные и фазовые состояния материалов. В ряде случаев (особенно при сухом трении) при высоких локальных давлениях в поверхностных слоях могут возникнуть такие температуры, которые приведут к появлению «мостиков сварки».

Сочетание повторных механических и термических напряжений способствует появлению микротрещин, смыкание которых на некоторой глубине приведет к отделению материала;

- 2) *протеканием химических процессов*, основными из которых являются: образование пленок окисла или других химических соединений; растворение одного из трущихся тел под влиянием механохимических воздействий в зоне контакта (например, растворение металла полимером); охрупчивание поверхностного слоя под действием атомарного водорода, выделяющегося из смазки или одного из трущихся тел, и др.

Основную роль при трении двух поверхностей обычно играют окислительные процессы.

Образование на поверхности металла тонких окисных пленок приводит к тому, что взаимодействуют не исходные материалы, а процесс изнашивания определяется свойствами окисных пленок. Отрываясь от основного металла, они или удаляются со смазкой и на поверхности появляется новая пленка, или идет их непрерывное механическое изнашивание. Окисные пленки, как правило, не схватываются так легко, как металлы, и адгезионные процессы в этом случае не оказывают существенного влияния на интенсивность изнашивания;

3) *взаимодействием сопряженных поверхностей через адгезионный слой.* Наиболее активно изнашивание протекает при сухом трении. Внешняя нагрузка в этом случае воспринимается отдельными микровыступами поверхности трения.

При *смешанном* трении нормальная нагрузка частично уравновешивается гидродинамическими силами микроклиньев смазочного материала, частично воспринимается контактирующими неровностями при сухом и граничном трении.

При *граничном* трении имеются более нагруженные зоны в месте сближения микровыступов, где создаются условия для усталостного разрушения. Смазка, находящаяся между микровыступами, предохраняет сопряженные поверхности от износа.

При *жидкостном* трении не создаются условия для протекания процессов изнашивания, так как слой смазки не допускает непосредственного взаимодействия поверхностей. В этом случае эпюра давлений распределена по всей номинальной поверхности трения, и нагрузки, действующие на отдельные микровыступы, не в состоянии привести к их разрушению;

4) *загрязнением смазочного материала*, что оказывает существенное влияние на интенсивность процесса изнашивания поверхности, а в результате этого износ может происходить даже при жидкостном трении. Наблюдаются следующие виды загрязняющих веществ:

- частички твердых веществ различного гранулометрического и химического состава;
- смолистые вещества;
- химически активные вещества (например, кислоты, вызывающие коррозионные процессы и старение масел);

– жидкие вещества, растворенные в смазочном материале, интенсифицирующие процессы изнашивания сопряженных поверхностей и смазочного материала.

Загрязняющие вещества, проникающие на поверхность трения и в смазочный материал извне через уплотнения или через систему смазки, могут являться продуктами износа данного или других сопряжений, отходами рабочего процесса машины (частицы нагара в двигателе, частицы шлифовального круга в станке), продуктами полимеризации и окисления масла.

Большое значение для повышения работоспособности пары трения имеет фильтрация смазочного материала, с помощью которой могут быть отделены твердые и смолистые вещества, а также коагулированные жидкости;

5) *переносом материалов с одной поверхности на другую.* В ряде случаев происходит перенос пленки с более пластичного (мягкого) материала на твердый («намазывание») в результате молекулярного схватывания или избирательный атомарный перенос.

Последнее явление происходит при трении пары «сталь — сплав меди» и заключается в выделении меди путем разрушения межатомных связей, переносе атомов меди на поверхность стали и образовании тончайшего слоя меди, которая не уносится из зоны контакта, а переносится с одной поверхности на другую, что придает высокую износостойкость узлу трения.

Исследования показывают, что при любом характере изнашивания, во-первых, имеется ведущий вид износа, и, во-вторых, идет его стабилизация за счет самоорганизации процесса разрушения поверхностных слоев.

Это явление, обнаруженное профессором Б. И. Костецким и названное им структурной приспособляемостью материалов при трении, заключается в способности материалов при соблюдении определенных условий спонтанно организовывать устойчивые, упорядоченные состояния.

Процессы самоорганизации состояния материала поверхностного слоя выражаются в образовании вторичных защитных структур, обладающих экстремальными свойствами и экранизирующим основной материал трущихся пар от непосредственного контакта и разрушения.

## 16.2 Классификация процессов изнашивания

В зависимости от ведущего процесса разрушения поверхности все *виды изнашивания* можно разделить на три основные группы:

- 1) механическое, которое происходит, главным образом, в результате механического воздействия материалов пары;
- 2) молекулярно-механическое, сопровождаемое воздействием молекулярных или атомарных сил;
- 3) коррозионно-механическое, которое происходит при трении материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой (рис. 16.1).

Разновидности этих процессов характеризуются специфическими явлениями, вызывающими разрушение микрообъемов материала при трении, и неодинаковой интенсивностью процесса.

*Абразивное изнашивание* возникает в том случае, когда на трущихся поверхностях находятся твердые частицы, разрушающие поверхность за счет резания и царапания с отделением стружки.

Хотя, как правило, принимаются меры для того, чтобы избежать этот вид изнашивания, обладающий большей интенсивностью, часто имеются причины для его возникновения (недостаточная фильтрация смазки, попадание абразива из окружающей среды, загрязнение поверхности трения продуктами износа). Некоторые детали машин работают непосредственно в абразивной среде (зубья ковша экскаватора, плуги и др.).

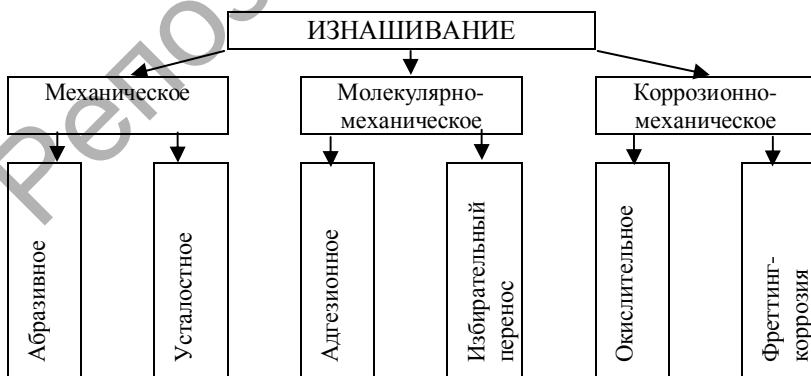


Рисунок 16.1 — Классификация процессов изнашивания

*Гидро- и газообразное* изнашивание происходит в результате воздействия твердых частиц, увлекаемых потоками жидкости или газа. Этот вид изнашивания, а также такие, как эрозионное и кавитационное, когда нет контакта двух твердых тел, относятся к процессам разъедания.

*Усталостное изнашивание* является следствием циклического воздействия на микроструктуры трущихся поверхностей. Отделение частиц может происходить в результате наклепа поверхностного слоя, который становится хрупким и разрушается. Иногда такой процесс называют *изнашиванием при хрупком разрушении*.

Следует отличать усталостный износ и контактную усталость поверхностных слоев, которая возникает при чистом качении и проявляется в развитии местных очагов разрушения.

*Адгезионное изнашивание* (при заедании) происходит в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность. Этот вид изнашивания относится к недопустимым видам повреждений, так как обладает высокой интенсивностью и приводит, как правило, к отказу функционирования изделия.

*Изнашивание в условиях избирательного переноса* характеризуется атомарными явлениями в зоне контакта и приводит к практически безизносным парам. Образовавшиеся на поверхности в результате своеобразных механохимических процессов мягкий и тонкий слой, обогащенный медью, обеспечивает оптимальные условия контактного взаимодействия.

*Окислительное изнашивание* происходит при наличии на поверхности пленок, образовавшихся в результате взаимодействия материала с кислородом. Существуют различные формы окислительного изнашивания: при удалении с поверхности трения ультрамикроскопических химически адсорбированных пленок (1-я форма), при удалении микропленок твердых растворов и эвтетик химических соединений кислорода и металла (2-я форма) и при периодическом образовании и выкрашивании сплошных твердых и хрупких слоев химических соединений кислорода и металла (3-я форма). В разрушении окисных пленок, более хрупких, чем основной металл, ведущую роль также играют усталостные процессы (табл. 16.2).

Т а б л и ц а 16.2 — Классификация процессов изнашивания

Скорость элементарных процессов разрушения	Вид изнашивания			Вид повреждения
	Механическое	Молекулярно-механическое	Коррозионно-механическое	
Быстро-протекающие	Абразивное	Адгезионное при заедании	Фреттинг-коррозия (3-я стадия)	Недопустимый
Средней скорости (циклические)	Усталостное малоцикловое (при хрупком разрушении)	При молекулярном переносе	Окислительное (3-я форма)	
Медленные	Усталостное	При избирательном переносе	Окислительное (1-я и 2-я формы)	

*Изнашивание при фреттинг-коррозии* происходит при малых колебательных перемещениях соприкасающихся тел. Этот вид изнашивания связан с процессами окисления и схватывания и проявляется обычно с большей интенсивностью. Малые относительные перемещения не допускают удаления образовавшихся окислов, что способствует возникновению высоких местных нагрузок и схватыванию.

Данный процесс является многостадийным, когда вначале происходит пластическая деформация микровыступов, схватывание ювенильных участков металла, возникновение и разрушение окисных пленок (1-я стадия). Затем начинают развиваться коррозионно-усталостные процессы (2-я стадия), а когда добавляется абразивное изнашивание (3-я стадия), интенсивность процесса разрушения резко возрастает. Фреттинг-коррозия относится к недопустимым видам изнашивания.

По скорости процессов разрушения фрикционных связей все виды изнашивания можно разделить на три группы:

1) *быстропротекающие процессы* разрушения микрообъемов, когда при первых же взаимодействиях происходит отделение продуктов изнашивания. Эти явления приводят к большей интенсивности процесса, и износ, как результат этих процессов, относится к недопустимым видам повреждений. Исключение может составить такой случай абразивного износа, когда за счет малой концентрации

абразивных частиц на поверхности трения суммарная интенсивность изнашивания поверхности невелика;

2) *процессы средней скорости* отделения элементарных микрообъемов материалов характерны при циклических процессах разрушения. К ним относятся процессы, интенсивность которых может изменяться в достаточно широких пределах, поэтому они могут считаться как допустимыми, так и недопустимыми видами повреждения;

3) *медленные процессы* разрушения микрообъемов происходят, когда для отделения частицы материала требуется достаточно большое число циклов (усталостное и окислительное изнашивание) или при стабилизации процесса взаимодействия материалов пары (избирательный перенос).

Если при взаимодействии поверхностей имеют место условия для возникновения изнашивания различных видов, то протекает тот процесс, который обладает большей скоростью.

## Основные закономерности изнашивания

### 16.3 материалов

---

Показателями износа являются:

1) *линейный износ*  $U$ , мкм — изменение размера поверхности при ее износе, измеренное в направлении, перпендикулярном к поверхности трения;

2) *скорость изнашивания*  $\gamma = dU / dt$ , мкм/ч — отношение величины износа ко времени, в течение которого он возник;

3) *интенсивность изнашивания*  $j = dU / dS$  — отношение величины износа к относительному пути трения  $S$ , на котором происходило изнашивание. Эта величина будет безразмерной, если линейный износ и путь трения измеряются в одних единицах.

Скорость и интенсивность изнашивания связаны соотношением

$$\gamma = jv, \quad (16.2)$$

где  $v$  — скорость относительного скольжения поверхностей трения.

Получение законов изнашивания на основе фундаментальных закономерностей физики и химии является чрезвычайно сложной задачей, которая в настоящее время находится в стадии становления,

поэтому на практике широко используют эмпирические зависимости, получаемые для определенного вида изнашивания при установленных условиях его протекания и для выбранного сочетания материалов.

Классическая форма кривой износа (рис. 16.2) имеет три периода. Первый период — микроприработка *I*, когда происходит трансформация начального (технологического) рельефа поверхности в эксплуатационный.

На рисунке 16.3 схематично показано, как микровыступы технологического рельефа деформируются при нагружении через сопряженную поверхность, а при относительном движении тел поверхностные слои подвергаются в зоне контакта многократным воздействием нормальных и тангенциальных напряжений и в сочетании с температурными влияниями и действием среды приобретают

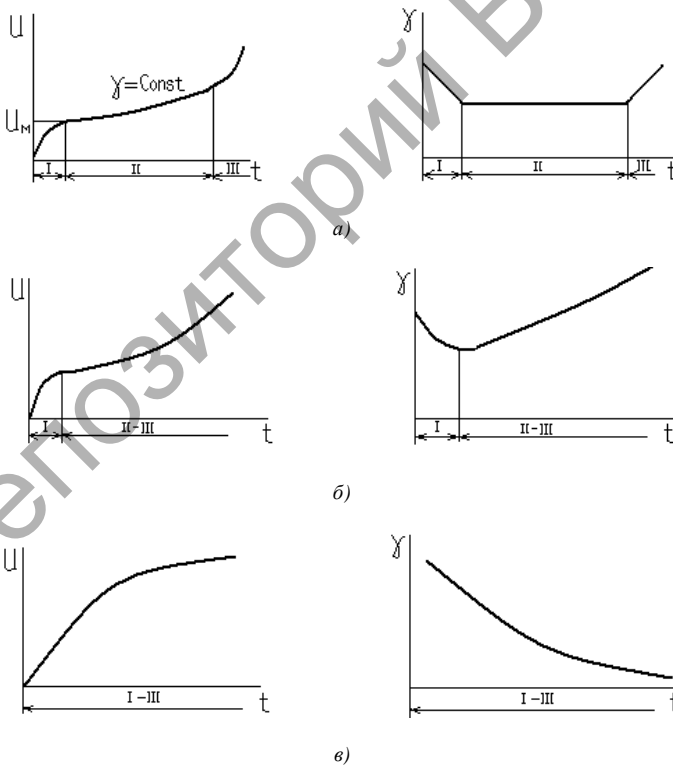


Рисунок 16.2 — Периоды протекания износа во времени

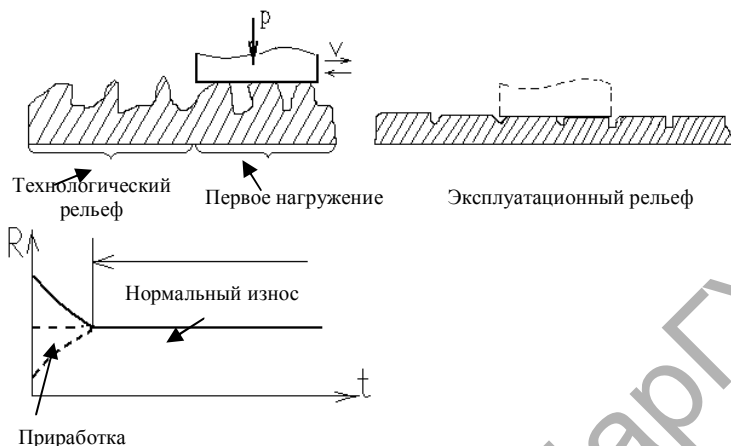


Рисунок 16.3 — Схема трансформации технологического рельефа поверхности в эксплуатационный

рельеф, характерный для данных условий эксплуатации. Одновременно происходит формирование вторичных структур. В этот период скорость изнашивания, как правило, монотонно убывает до значения  $\gamma = \text{const}$ , что характерно для периода II установившегося (нормального) износа.

Если нет причин, изменяющих параметры установившегося процесса изнашивания, то он протекает стационарно, а возможные отклонения от средней скорости процесса не влияют на общую линейную зависимость. Для некоторых случаев имеет место период III интенсивного или катастрофического износа, когда наблюдается существенное возрастание скорости изнашивания.

В общем виде закон изнашивания может быть выражен формулой

$$U = kp^m v^n t^a, \quad (16.3)$$

- где  $U$  — линейный износ;  
 $k$  — коэффициент износа;  
 $p$  — давление на поверхности трения;  
 $v$  — скорость относительного движения трущихся поверхностей;

$t$  — продолжительность изнашивания;  
 $m$ ,  $n$  и  $a$  — показатели (коэффициенты).

Обычно для установившегося износа при нормальных условиях эксплуатации  $a = 1$  (см. рис. 16.2,  $a$ ), а если не происходит изменения вида изнашивания то, как правило, и  $n = 1$ . Для этого весьма распространенного случая

$$U = kp^m vt; \quad \gamma = \frac{U}{t} = kp^m v; \quad j = \frac{U}{vt} = kp^m; \quad U = kp^m s, \quad (16.4),$$

где  $s = vt$  — путь трения одной поверхности относительно другой.

Скорость изнашивания  $\gamma$  является универсальной характеристикой, и интенсивность изнашивания  $j$  целесообразно применять лишь при  $n = 1$ . При  $m = 1$  коэффициент износа будет равен  $k = j / p$ . Данное выражение широко применяется для оценки коэффициента износа при расчетах и исследованиях износа, однако оно справедливо при  $n = 1$  и  $m = 1$ .

Обычно коэффициент  $m$  находится в пределах 0,5—3, а для абразивного и усталостного видов изнашивания можно принимать  $m = 1$ .

При  $n = 1$  износ зависит не от скорости относительного скольжения, а от пути трения.

**Коэффициент износа** — комплексная характеристика, которая зависит от применяемых материалов, вида смазки и трения, условий эксплуатации (например, возможность засорения смазки абразивом).

Коэффициент износа непосредственно зависит от вида изнашивания, так как он численно равен интенсивности изнашивания, отнесенной к единице давления на поверхности трения.

Он изменяется, как правило, в достаточно широких пределах, поскольку зависит от большого числа факторов.

В большинстве случаев теория изнашивания материалов не позволяет чисто аналитически определить  $j$  или  $k$  дает лишь их количественные значения, поэтому при решении практических задач надежности необходимо использовать дополнительные источники информации об износостойкости материалов различных сопряжений.

### 17.1 Общие сведения

Существующие методы расчета деталей на износ не гарантируют точного определения их ресурса, поэтому основным критерием истинности проводимых расчетов может служить практика: наблюдение за изнашиванием деталей в эксплуатации или, по крайней мере, испытания в лабораторных условиях, максимально приближенных к эксплуатационным [43].

Согласно современным представлениям разрушение деталей из-за изнашивания рассматривается как энергетический процесс, во время которого происходит активация и разрушение микроскопических образований (квазичастиц), находящихся в поверхностном слое детали. Причем в процессе разрушения участвуют только те квазичастицы, которые обладают энергией, превышающей величину энергии активации, так называемые активные квазичастицы, суммарная энергоемкость которых является мерой запаса работоспособности детали.

В процессе нормального изнашивания детали между поступлением энергии от превращения внешней механической работы трения и энергией, затрачиваемой на активацию квазичастиц, наблюдается равновесие, которое после определенного времени работы нарушается из-за исчерпания квазичастиц и приводит к количественному и качественному изменению в процессе изнашивания.

Известно, что интенсивность изнашивания одинаковых деталей в основном обуславливается количеством тепловой энергии, образующейся на контактирующих поверхностях трущихся деталей. Если детали работают в условиях энергетического равновесия, то интенсивность изнашивания, в связи со стабилизацией поступления тепловой энергии, должна быть постоянной. Энергетическое равновесие изнашивания детали может быть достигнуто при различных режимах работы, включая режим, соответствующий активации максимального (критического) числа квазичастиц. При этом отсутствует избыточная тепловая энергия и, следовательно, нет

источников, вызывающих изменение характеристик изнашивания (интенсивности изнашивания, коэффициента трения).

Внешнюю механическую работу, зависящую от нагрузки и относительной скорости скольжения, без существенного изменения интенсивности изнашивания детали можно увеличивать до тех пор, пока не начнется активация критического числа квазичастиц. Дальнейшее увеличение нагрузки или скорости приведет к нарушению энергетического равновесия и, как следствие, к катастрофическому износу.

## Энергетическая концепция ускоренных

### 17.2 ИСПЫТАНИЙ

Одинаковые детали должны иметь постоянную величину запаса работоспособности [43]. Утрата работоспособности деталями происходит со скоростью, соответствующей поступлению энергии превращения внешней механической работы, которая характеризуется условиями нагруженности детали и условиями эксплуатации. При одних и тех же условиях эксплуатации

$$v = f(R), \quad (17.1)$$

где  $v$  — скорость утраты работоспособности;

$R$  — режимный параметр.

Внешняя механическая работа является результатом вклада различных форм энергии, поэтому параметр  $R$  есть функция многих факторов, т. е.

$$R = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (17.2)$$

Функция (17.2) в теории планирования экспериментов носит название функции отклика и обычно представляется в виде полинома

$$R = b_{0j} + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m b_{ijk} x_i x_k + \dots, \quad (17.3)$$

где  $b_{0j}$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ijk}$  — коэффициенты регрессии, определяемые в результате факторного эксперимента.

Если для одинаковых деталей изменение режимного параметра происходит только из-за одного фактора  $x_1$  (остальные факторы неизменны), то определение функции (17.2) упрощается

$$R = \varphi(x_1). \quad (17.4)$$

Если, например, при испытании одинаковых деталей изменяется только скорость скольжения при неизменных нагрузке и остальных условиях, то

$$R = \varphi(v). \quad (17.5)$$

Полагая, что изменение  $v$  происходит по степенной зависимости, получим

$$v = f(R) = v_i^m, \quad (17.6)$$

где  $v_i$  — скорость скольжения;

$m$  — показатель степени, определяемый экспериментально.

### 17.3 Запас работоспособности детали

---

Коэффициент запаса работоспособности  $C$  может быть определен, если известны скорость и время утраты деталями работоспособности [45]:

$$C = v_i^m t_i, \quad (17.7)$$

где  $t_i$  — время утраты работоспособности (ресурс).

Каждому скоростному режиму  $v_i$  соответствует свой ресурс  $t_i$ . Запас работоспособности  $C$  может быть графически изображен прямоугольником (рис. 17.1), сторонами которого является ордината, равная величине режимного фактора, и абсцисса, равная ресурсу при данном скоростном режиме.

Например, в точках  $A$ ,  $B$  и  $D$  запас работоспособности изобразится площадями  $R_1 A t_1 O$ ,  $R_2 B t_2 O$ ,  $R_3 D t_3 O$ . Нетрудно заметить, что при изменении режимного параметра соответственно изменяется ресурс при той же величине запаса работоспособности для данных деталей.

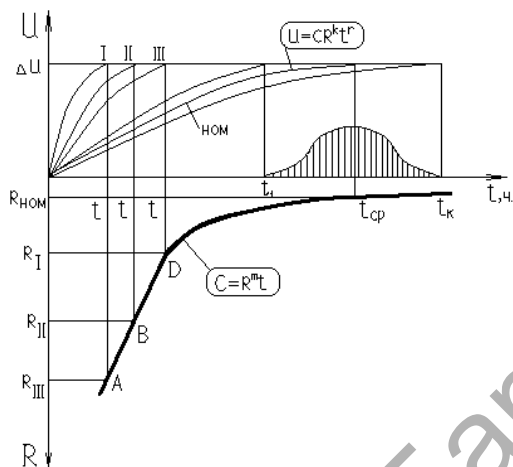


Рисунок 17.1 — Связь между кривыми износа в различных режимах и зависимостью коэффициента запаса работоспособности

Для определения ресурса детали при номинальном или любом другом режиме эксплуатации нет необходимости проводить ресурсные испытания при заданном режиме, достаточно использовать выражение (17.8), подставив значение заданного режима, т. е.

$$t_i = \frac{C}{v_i^m}. \quad (17.8)$$

Параметры зависимости (17.8) могут быть получены путем статистической обработки результатов испытаний при более жестких (форсированных) режимах.

Количественной характеристикой энергетического параметра запаса работоспособности при изнашивании детали может служить величина ее износа, выраженная в объемных, линейных или весовых единицах. Величину максимального износа детали обычно назначают исходя из технических требований на весь узел или устройство, в котором должна работать рассматриваемая деталь. Вполне вероятно, что назначенная величина износа может быть меньше той,

которая бы соответствовала полному расходованию запаса работоспособности. В этом случае кривая запаса работоспособности (см. рис. 17.1) сместится влево.

Если износ деталей происходит в режимах, соответствующих энергетическому равновесию, то кривые износа, построенные по результатам измерений в процессе испытаний, могут быть выражены единой функциональной зависимостью вида

$$U = aR^k t^r, \quad (17.9)$$

где  $U$  — величина износа, определяемая из условий функционального назначения, точности или прочности детали;

$a$  — коэффициент, зависящий от конструктивных и технологических особенностей детали;

$R$  — режимный параметр;

$k, r$  — показатели степени.

Точность определения ресурса по формуле (17.8) может быть проверена путем расчета ресурса при заданном режиме по следующему выражению, полученному из формулы (17.9):

$$t_1 = r \sqrt[r]{\frac{U}{aR^k}}. \quad (17.10)$$

Очень важным вопросом ускоренных испытаний на износ является выбор форсированного режима [43]. Теоретические и экспериментальные исследования трения и износа показывают, что в широком диапазоне режимов эксплуатации можно выделить область, в которой значения интенсивностей изнашивания постоянны независимо от изменения скорости скольжения и нагрузки (рис. 17.2). Эта область характерна для нормального изнашивания, когда имеется энергетическое равновесие в детали.

Эксплуатация детали на третьем участке (см. рис. 17.1) вызывает нарушение энергетического равновесия, так как число квазичастиц истощается, при этом выделяется избыток тепловой энергии, изменяющий физико-химическую картину изнашивания. Эксплуатация деталей на этом участке ненадежна, связана с опасностью внезапного отказа, поэтому можно считать, что нормальное функционирование

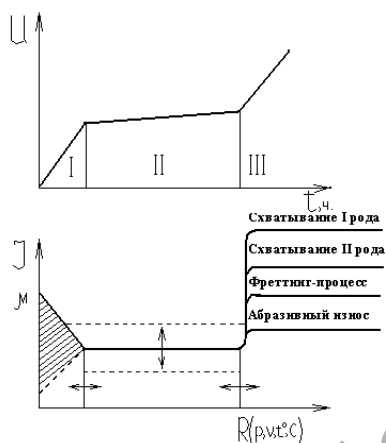


Рисунок 17.2 — Изменение интенсивности изнашивания в зависимости от режимов трения (давления, скорости скольжения, температуры)

для ответственных деталей заканчивается на границе второго и третьего участков, следовательно, предельно возможная степень форсирования ограничивается вторым участком.

#### 17.4 Определение предельного режима испытаний

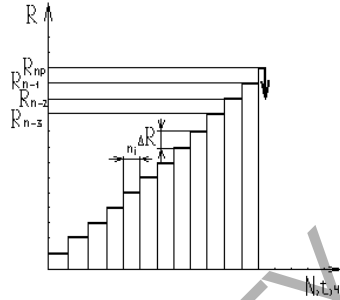
Предельный режим форсирования определяют по резким изменениям температуры на поверхности трения, силе трения и интенсивности изнашивания, связанными с нарушением энергетического равновесия и появлением избыточной тепловой энергии.

Предельный режим можно определить ступенчатым нагружением детали [43], при котором установившаяся температура на поверхности трения, сила трения и интенсивность изнашивания должны возрастать пропорционально увеличению нагрузки. Как только будет достигнута критическая величина нагрузки, нарушится энергетическое равновесие, резко изменятся физические процессы изнашивания (качественная сторона процесса) и соответственно скачкообразно

изменяется температура, величина силы трения и интенсивность изнашивания (количественная сторона процесса).

В качестве предельного режима для ускоренных испытаний деталей выбирают режим  $R_{n-1}$ , соответствующий  $(n - 1)$ -й ступени нагружения (рис. 17. 3.)

Он близок к критическому режиму  $R_{np}$ , но здесь еще нет нарушения энергетического равновесия, поэтому закономерность нормального изнашивания должна сохраняться, а физика процесса изнашивания оставаться неизменной. Форсированные режимы  $R_{n-2}$  и  $R_{n-3}$  назначаются соответственно степеням нагружения  $(n - 2)$  и  $(n - 3)$ . Для всех режимов выполняются условия равенства интенсивностей изнашивания и температур трущихся поверхностей. Можно назначать и нижние ступени, но это приведет к увеличению длительности испытаний.



$R_{np}$  — предельный режим нагружения,  
 $R_{n-1}$  — I форсированный режим,  
 $R_{n-2}$  — II форсированный режим,  
 $R_{n-3}$  — III форсированный режим

Рисунок 17.3 — Ступенчатое нагружение для определения форсированного режима испытаний

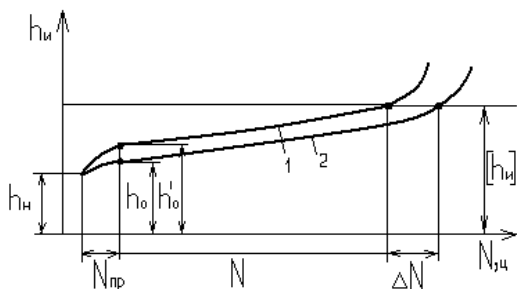
## 18

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПО КРИТЕРИЮ ИЗНОСА

### 18.1 Кривая изнашивания сопряжения

Классическая кривая износа, впервые установленная итальянцем Лоренцом в 1934 г. при испытании крючковых цепей, состоит из трех характерных участков (рис. 18.1).

На первом участке, соответствующем периоду приработки, изнашивание происходит с относительно большой скоростью и может достигать значительных величин по сравнению с полной величиной износа деталей. Этот участок обычно невелик по сравнению со всей кривой и часто при расчетах его не принимают во внимание. Далее следует участок кривой с постоянной скоростью изнашивания



1 — без приработки; 2 — с приработкой  
 ( $h_{и1}$  — начальный зазор в сопряжении до приработки;  
 $h_{и0}$  — зазор после приработки;  $h'_{и0}$  — зазор сопряжения  
 без приработки;  $[h_{и}]$  — предельный зазор вследствие  
 износа)

Рисунок 18.1 — График износа пары трения

(«нормальный период» или «нормальное изнашивание»). На последнем участке скорость изнашивания вновь возрастает (период «аварийного или катастрофического изнашивания»). Установленная Лоренцом кривая оказалась справедливой для различных трущихся сопряжений.

Изменение износа деталей во времени может отличаться от характера кривой износа, предложенной Лоренцом. В отдельных сопряжениях период приработки, как и период «аварийного» изнашивания, может отсутствовать. Однако общая тенденция к постепенному увеличению износа характерна для всех сопряжений. Это объясняется усталостным характером процесса изнашивания.

С точки зрения расчета ресурса и безотказности изнашивающихся деталей интерес представляет второй участок на кривой изнашивания (см. рис. 18.1), так как именно он соответствует периоду нормального функционирования изделия. Первый участок кривой, соответствующий приработке, является достаточно малым по длительности по сравнению со вторым. Несмотря на это, процесс приработки является весьма важным, оказывающим значительное влияние на последующий период «нормального» изнашивания. Именно от правильности (режима, длительности) соблюдения процесса приработки зависит длительность второго участка. Часто процесс приработки входит в технологический процесс изготовления изделия,

и изделие поступает потребителю уже приработанным, так что отсчет времени функционирования начинается после приработки. Третий участок также не принимается в расчет, так как работа изделий на этом участке ненадежна, связана с опасностью внезапных отказов. Как правило, процесс изнашивания на третьем участке сопровождается повышенным шумом и вибрацией.

В области «нормального» изнашивания (второй участок на рисунке 17.2), согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям, значения интенсивностей изнашивания постоянны независимо от изменения скорости скольжения нагрузки. Как указывал профессор Б. И. Костецкий, для всех известных в природе и технике материалов существует диапазон нагрузок и скоростей перемещения, где трение и износ на несколько порядков ниже, чем вне этого диапазона. Эта общая закономерность была представлена на рисунке 17.2.

Таким образом, если ограничиться рассмотрением области «нормального» изнашивания, то изнашивание может быть представлено в виде прямой, наклоненной к оси абсцисс под углом, зависящим от качества приработки и скорости изнашивания (рис. 18.2).

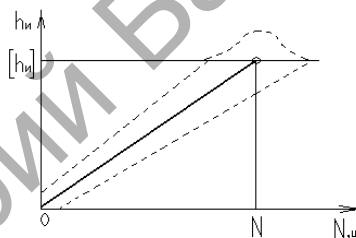


Рисунок 18.2 — Расчетная схема нормального изнашивания

## 18.2 Расчетная схема нормального изнашивания

Начало прямой соответствует концу приработки, заканчивается прямая на уровне  $h_u$ , соответствующем переходу «нормального» изнашивания в «катастрофическое». Значение  $h_u$  может быть уменьшено, если предъявлены повышенные требования к точности сопряжения. Аналитически процесс изнашивания в данном случае выражается следующей зависимостью:

$$\Delta_u = kqL, \quad (18.1)$$

где  $k$  — коэффициент износа материала детали;  
 $q$  — нормальное давление в контакте.

Например, для зубчатых колес нормальное давление в контакте определяется по формуле

$$q = 0,328 \sqrt{\frac{F_n E_{\text{пр}}}{b_w \rho_{\text{пр}}}}, \quad (18.2)$$

где  $F_n$  — нормальная сила в зацеплении, Н;

$E_{\text{пр}}$  — приведенный модуль упругости, МПа;

$b_w$  — ширина венца, мм;

$\rho_{\text{пр}}$  — приведенный радиус кривизны, который определяется из соотношения

$$\frac{1}{\rho_{\text{пр}}} = \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}, \quad (18.3)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — радиусы кривизны в контакте соответственно для зубьев шестерни и зубчатого колеса.

Нормальная сила в зацеплении  $F_n$  определяется по формуле

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \alpha} = \frac{2T_{\Sigma}}{d_1 \cos \alpha}, \quad (18.4)$$

где  $F_t$  — окружная сила, Н;

$T_{\Sigma}$  — суммарный момент на шестерне, Н.

При этом  $T_{\Sigma}$  вычисляется по формуле

$$T_{\Sigma} = T_n + T_d, \quad (18.5)$$

где  $T_n$  — нагрузочный момент, зависящий от передаваемой нагрузки, для любой  $i$ -й пары механизма;

$T_d$  — динамический момент, возникающий в результате наличия и увеличения зазоров между зубьями зацепляющихся колес.

Для любой  $i$ -й пары нагрузочный момент равен

$$T_{H_i} = \frac{T_{i-1}}{u_i \left(1 - \eta_{3n}^i\right) \left(1 - \eta_n^{i-1}\right)}, \quad (18.6)$$

где  $\eta_{zn}^i$ ,  $\eta_n^{i-1}$  — потери на трение соответственно в зубчатом зацеплении и опорах.

Ширина венца  $b_w$  находится по формуле

$$b_w = \phi_m m, \quad (18.7)$$

где  $\phi_m$  — коэффициент ширины зуба, который выбирается в зависимости от модуля в следующих пределах: для  $m \leq 0,3$  мм  $\phi_m = 3,33 \dots 1,7$ ;  $m = 0,4 \dots 1,0$  мм  $\phi_m = 2,5 \dots 1,2$ .

Приведенный модуль упругости  $E_{пр}$  равен

$$E_{пр} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}, \quad (18.8)$$

где  $E_1$ ,  $E_2$  — модули упругости материала соответственно шестерни и зубчатого колеса, МПа.

Если шестерня и зубчатое колесо выполнены из одного материала, то

$$E_{пр} = E_1 = E_2. \quad (18.9)$$

В процессе работы из-за изнашивания зубьев величина  $\rho_{пр}$  подвержена некоторому изменению, так как изменяются радиусы  $\rho_1$  и  $\rho_2$  кривизны изношенных зубьев сопряженных колес. Расчет  $\rho_{пр}$  для неизношенных зубьев и изношенных на треть толщины зуба зубчатых колес показывает, что  $\rho_{пр}$  для изношенных зубьев уменьшается не более, чем на 2,5—4%, поэтому в дальнейших расчетах, учитывая малость погрешности, вносимой с изменением  $\rho_{пр}$ , будем считать ее постоянной. И тогда, подставив в формулу (18.9) значения  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , выраженные через диаметры делительных окружностей для прямозубых колес

$$\rho_1 = \frac{d_1}{2} \sin \alpha; \quad \rho_2 = \frac{d_2}{2} \sin \alpha; \quad u = \frac{d_2}{d_1},$$

получим

$$\frac{1}{\rho_{пр}} = \frac{2(u+1)}{d_1 u \sin \alpha}. \quad (18.10)$$

## Расчет зубьев колес на надежность

### 18.3 по критерию износа

Для того чтобы проводить расчеты зубьев колес прямозубой зубчатой передачи по критерию износа [44], необходимо принять некоторые допущения. Положим, что коэффициент износа  $k$  является основной характеристикой износостойкости материала зубчатого колеса и не зависит от конструктивных, технологических и эксплуатационных особенностей колеса, а зависит лишь от свойств материала; величина и параметры закона распределения этого коэффициента определяются свойствами материала зубчатого колеса. Это допущение правомерно и соответствует требованиям, предъявляемым к основным характеристикам материалов деталей машин.

Если изготовить зубчатые колеса из различных материалов и испытывать их в одинаковых условиях, то можно получить ряд коэффициентов износа, характеризующих свойства материалов. Такие зубчатые колеса назовем нормированными, а коэффициенты износа для них обозначим  $K_0$ . В качестве нормированной зубчатой пары можно принять, например, зубчатую пару со следующими параметрами: число зубьев шестерни  $z_1 = 40$ , зубчатого колеса  $z_2 = 80$  (модуль  $m = 1$  мм), ширина венца колеса  $b = 4,0$  мм, степень точности 7F по ГОСТ 9.178-81. Необходимо путем массовых испытаний определить закон распределения случайной величины  $K_0$  и другие статистические характеристики:

$$[K_0] = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n k_{0i}; \quad S_{k_0}^2 = \frac{1}{l-1} (k_{0i} - [K_0])^2; \quad S'_{k_0} = \sqrt{S_{k_0}^2}. \quad (18.11)$$

По результатам ускоренных испытаний зубчатых пар найдены статистические характеристики коэффициентов износа для некоторых материалов (табл. 18.1) [44].

Для перехода от нормированного колеса к расчету конкретного, отличающегося размерами, технологическими и эксплуатационными особенностями, необходимо определить коэффициент износа по формуле

$$k_u = [K_0] A_t A_e, \quad (18.12)$$

Т а б л и ц а 18.1 — Коэффициенты износа для нормированных зубчатых колес

Материал зубчатой пары	Твердость	Смазка	$[K_0]$	$S_{k_0}^2$
Сталь 20Х13 — Сталь 20Х13	28-32	ВНИИНП 220	$1,22 \cdot 10^{-14}$	$0,08 \cdot 10^{-14}$
Сталь 25Х13Н2 — Сталь 25Х13Н2	28-32	ВНИИНП 220	$1,04 \cdot 10^{-14}$	$0,13 \cdot 10^{-14}$
Сталь 25Х13Н2 — Бронза КМц3-1Т	190-200	ОКБ 122-16	$5,55 \cdot 10^{-12}$	$0,619 \cdot 10^{-12}$

где  $A_t$  — коэффициент, учитывающий технологические особенности зубчатого колеса;

$A_e$  — коэффициент, учитывающий особенности эксплуатации.

Коэффициент  $A_t = f(a_R, a_{НВ}, a_{П}, a_{уп}, a_{st})$  зависит от шероховатости  $a_R$ , твердости  $a_{НВ}$  поверхности, наличия и свойств покрытия  $a_{П}$ , упрочнения  $a_{уп}$  поверхности зуба и степени точности колеса  $a_{st}$ .

Коэффициент  $A_e = f(a_{см}, a_{ос}, a_{др})$  зависит от наличия и свойств смазки, окружающей среды  $a_{ос}$  и других особенностей эксплуатации  $a_{др}$ .

Коэффициенты  $A_t$  и  $A_e$  определяются путем многофакторного эксперимента.

Износ зуба зубчатого колеса определяется из следующего выражения [44]:

$$\Delta_u = [K_0] q L_{mp} A_t A_e, \quad (18.13)$$

где  $q$  — нормальное давление в контакте;

$L_{mp}$  — путь трения.

Параметры  $[K_0]$  и  $q$  являются случайными величинами, имеющими вероятностную природу. Коэффициент  $[K_0]$  зависит от многих случайных величин, поэтому и сам является величиной случайной. Нормальное давление  $q$  зависит от нагрузки, которая является случайной величиной. Давление в зависимости от профиля контакта (погрешности изготовления деталей, износа) также меняет свое значение.

Если  $T_{\Sigma}$  меняется в широких пределах, то необходимо найти эквивалентное нормальное давление, используя известные методы по ГОСТ 23.604-79. Если же  $T_{\Sigma} = \text{const}$ , то определяется среднее значение или математическое ожидание давления при известном законе его распределения.

При заданной предельной величине износа  $[\Delta_u]$  и нормальном законе распределения скорости изнашивания ресурс зубчатого колеса по критерию износа определяют по формуле

$$N = \frac{[\Delta_u]}{\gamma_u + U_p S'_\gamma} = \frac{[\Delta_u]}{\left\{ [\bar{K}_0] + U_p S'_{k_0} \right\} \left( \bar{q} + U_p S'_q \right) d_b A_t A_e} \times \frac{1}{\left( \alpha_2^2 - \alpha_1^2 \right) / 240c}, \quad (18.14)$$

где  $[\Delta_u]$  — предельная величина износа зуба, равная разности между начальной (исходной) толщиной зуба и изношенной  $[\Delta_u] = S'_0 - S'_u$ .

Доверительный интервал для значений ресурса при заданной вероятности безотказной работы и достоверности определяют по формуле

$$N + t_\beta \frac{S'_N}{\sqrt{l}} > \bar{N} > N - t_\beta \frac{S'_N}{\sqrt{l}}. \quad (18.15)$$

Вероятность безотказной работы зубчатой передачи при заданном ресурсе определяют по формуле

$$P(N) = 0,5 + \Phi \left( \frac{[\Delta_u] - \bar{\gamma}_u N}{NS'_N} \right) \quad (18.16)$$

В формулах (18.14)—(18.16) приняты следующие обозначения:

- 1)  $\bar{\gamma}_u$  — средняя скорость изнашивания (математическое ожидание) материала рассчитываемого зубчатого колеса;
- 2)  $U_p$  — квантиль нормального распределения;
- 3)  $t_\beta$  — табулированное значение достоверности;
- 4)  $S'_N$  — дисперсия;
- 5)  $l$  — число испытанных колес;
- 6)  $\Phi$  — функция Лапласа.

## Расчет надежности зубчатого редуктора

### 18.4 по критерию точности

Одним из показателей точности зубчатой передачи является боковой зазор, а редуктора — свободный (мертвый) ход, складывающийся из боковых зазоров между зубьями пар, люфтов в опорах и упругих деформаций валиков и осей [44].

Свободный ход не только характеризует точность зубчатого механизма, но и является одним из показателей его работоспособности. Свободный ход можно представить в виде сложной функции, зависящей от начального свободного хода и функций износа элементов механизма (редуктора):

$$\varphi(t) = \varphi[\varphi_0, f_1(t), f_2(t) \dots f_i(t) \dots f_n(t)], \quad (18.17)$$

где  $\varphi_0$  — начальный свободный ход;  
 $f_1(t) \dots f_n(t)$  — функции износа зубьев колес и опор зубчатой передачи.

Кривые износа обычно описываются степенными функциями с различными показателями степени, зависящими от скорости изнашивания:

$$f_i(t) = at^m. \quad (18.18)$$

При  $a = 1$  и  $m = 1$   $f_i(t) = 1$  для  $m > 1$  зависимость имеет вид вогнутой кривой с постоянным подъемом вверх. Вогнутость функции  $f_i(t)$  имеет принципиальное значение, поэтому необходимо доказать, что она действительно будет вогнутой. При  $m > 1$  для  $t \in ]0, \infty[$  функция будет вогнутой, если при  $t_1 \neq t_2$  выполняется неравенство

$$f\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \leq \frac{f_1(t) + f_2(t)}{2} \quad \text{или} \quad \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)^m \leq \frac{t_1^m + t_2^m}{2}. \quad (18.19)$$

Справедливость этого неравенства доказывается методом полной математической индукции. Пусть  $m = 2$ , тогда

$$\left(\frac{t_1+t_2}{2}\right)^2 = \frac{t_1^2+t_2^2+2t_1t_2}{2\cdot 2} \leq \frac{t_1^2+t_2^2+t_1^2+t_2^2}{4} = \frac{t_1^2+t_2^2}{2}.$$

Допустим, что для  $m = k$  справедливо неравенство

$$\left(\frac{t_1+t_2}{2}\right)^k \leq \frac{t_1^k+t_2^k}{2}.$$

Тогда, умножив обе части неравенства на  $(t_1+t_2)/2$ , получим

$$\begin{aligned} \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right)^{k+1} &= \frac{t_1^{k+1}+t_2^{k+1}+t_1^k t_2+t_1 t_2^k}{4} \leq \\ &\leq \frac{t_1^{k+1}+t_2^{k+1}+t_1^{k+1}+t_2^{k+1}}{4} = \frac{t_1^{k+1}+t_2^{k+1}}{2}, \end{aligned}$$

т. е, доказано, что если неравенство (18.19) справедливо для  $m = k$ , то оно справедливо и для  $m=k+1$ . Этим самым доказано последнее неравенство. Следовательно, если  $m > 1$  при  $t \in ]0, \infty[$ , то функция  $f_i(t) = at^m$  — вогнутая.

В связи с тем, что элементы механизма работают с различными скоростями и нагрузками, кривые износа соответственно будут иметь различную кривизну, характеризующуюся коэффициентом  $m$  в зависимости (18.19). Так как функция  $\varphi(t)$  является сложной функцией, зависящей от множества степенных функций вида (18.19), которые, как было выше доказано, являются вогнутыми, то и сама функция  $\varphi(t)$  в соответствии со свойствами функций должна быть вогнутой. Далее можно доказать, что сложная функция, суммирующая ряд элементарных степенных функций, является показательной.

Пусть функция  $\varphi(t)$  будет представлена показательной функцией вида

$$\varphi(t) = \varphi_0 e^x, \quad (18.20)$$

где  $x$  — переменная величина.

Можно представить  $e^x$  в виде ряда

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^{(n-1)}}{(n-1)!} + \frac{x^n}{n!}. \quad (18.21)$$

Члены этого ряда — степенные функции с показателями степени от 0 до  $n$ .

Формально процесс изменения свободного хода во времени может рассматриваться как некоторый случайный процесс, который является непрерывным, стационарным, свидетельствующим о том, что все объекты однородны по своему качеству и свойства их практически не изменяются до тех пор, пока свободный ход не достигнет предельного значения. Такой процесс может быть достаточно точно описан элементарной показательной функцией вида [44]

$$\varphi(t) = \varphi_0 b^t + x_0(t), \quad (18.22)$$

где  $\varphi_0$  — начальный свободный ход;

$b$  — параметр, зависящий от свойств материалов колес и опор и режимов работы;

$x_0(t)$  — случайная функция времени с математическим ожиданием, равным нулю.

Функции (18.20) и (18.22) идентичны, так как можно принять показатель  $x = kt$  и  $k = \ln b$ , тогда

$$\varphi(t) = \varphi_0 b^t = \varphi_0 e^{kt}. \quad (18.23)$$

Функция (18.23) является монотонной, непрерывной и вогнутой. Коэффициент  $b \in ]1, 2[$  [ незначительно отличается от 1, поэтому эту функцию удобнее представить в виде

$$\varphi(t) = \varphi_0 (1+c)^t \quad (18.24)$$

где  $c = b - 1$ .

Путем проведения массовых испытаний при различных скоростных режимах получают коэффициенты  $b$ .

## Вероятностный расчет механизма, содержащего мелко модульные зубчатые

### 18.5 передачи, по критерию точности

Ресурс мелко модульной зубчатой передачи  $t$ , ч, при заданном предельном свободном ходе  $[\varphi(t)]$  вычисляют по формуле [44]

$$t = \frac{\lg[\varphi(t)] - \lg \varphi_0}{\lg(1+c)}. \quad (18.25)$$

Если необходимо определить ресурс в циклах, то использует выражение  $N = 60nt$ , где  $n$  — частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $t$  — ресурс, ч.

Средний ресурс определяют по формуле

$$\bar{t}_i = \frac{1}{l} \sum_i^l t_i, \quad (18.26)$$

где  $i$  — число объектов в партии.

Вычисляем дисперсию, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации ресурса

$$S_t^2 = \frac{1}{l-1} \sum (t_i - \bar{t}_i)^2; \quad S'_t = \sqrt{S_t^2}; \quad v_t \frac{S'_t}{\bar{t}_i} 100\%. \quad (18.27)$$

Принимая нормальный закон распределения отказов, рассчитываем вероятность безотказной работы при заданном ресурсе

$$P(t) = 1 - Q(t), \quad Q(t_1 < t < t_2) = \Phi_2 \left( \frac{t_2 - \bar{t}_i}{S'_t} \right) - \Phi_1 \left( \frac{t_1 - \bar{t}_i}{S'_t} \right), \quad (18.28)$$

где  $Q(t_1 < t < t_2)$  — вероятность появления отказов в области от  $t_1$  до  $t_2$ ;

$\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — функции Лапласа.

Находим доверительный интервал

$$t_i - \frac{S'_t}{\sqrt{l-1}} t_\beta \leq \bar{t}_i \leq t_i + \frac{S'_t}{\sqrt{l-1}} t_\beta. \quad (18.29)$$

Для принятия решения о техническом состоянии технической системы необходимо провести точное диагностирование с указанием, при необходимости, места, вида и причины возникновения дефектов. **Под техническим состоянием технической системы** понимается совокупность ее внутренних свойств, подверженных изменениям при производстве и эксплуатации, характеризующих соответствие или несоответствие качества изделия требованиям, установленным эксплуатационно-технической документацией на данное изделие. Техническое состояние технической системы характеризуется определенными признаками, которые, в свою очередь, зависят от количественных и качественных характеристик, свойств технической системы.

Внутренние свойства технической системы определяются совокупностью свойств взаимосвязанных и взаимозависимых функциональных элементов, из которых она состоит.

Общее число состояний, в которых может находиться та или другая техническая система, определяется числом функциональных элементов и связей между ними.

Переходы технической системы из одного состояния в другое являются случайными событиями, поэтому любое состояние системы до осуществления диагностирования обладает некоторой неопределенностью, для раскрытия которой необходимо провести техническую диагностику. Результатом технической диагностики должно быть заключение о техническом состоянии изделия. При выходе хотя бы одного из функциональных параметров за установленные границы нарушается работоспособность технической системы, т. е. происходит событие, называемое отказом. В результате этого ТС переходит в неработоспособное состояние.

Наряду с этими состояниями выделяется предельное состояние, при котором дальнейшая эксплуатация ТС нецелесообразна или недопустима. Это связано, как правило, с тем, что работоспособная ТС может перейти из безопасного состояния в опасное. Такие состояния ТС являются предметом анализа не теории надежности, а теории безопасности, которая в последнее время интенсивно развивается [11н]<sup>1</sup>. Для

---

<sup>1</sup> Здесь и далее указываются номера источников из общего списка «Перечень нормативно-технических документов».

технических систем, представляющих опасность при изготовлении или эксплуатации, наиболее значимым из совокупности свойств, входящих в понятие «надежность», является безотказность, под которой понимается свойство ТС сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

В качестве базового (ключевого) понятия в этом определении выступает работоспособное состояние. Находясь в этом состоянии, ТС выполняет свои функции, которые соответствуют ее назначению, т. е. правильно и своевременно решает поставленные перед ней функциональные задачи. Перечень этих функций (целевых задач) определяется в нормативно-технической и (или) конструкторской документации и характеризуется определенными параметрами.

Важным средством повышения надежности и безопасности технических систем в процессе эксплуатации является функциональная диагностика, которая дает возможность контролировать объект в процессе выполнения им рабочих функций и реагировать на отказ в момент его возникновения. Данные системы проектируются и изготавливаются вместе с контролируемым объектом.

Процесс диагностирования представляет собой подачу в техническую систему последовательности входных проверочных воздействий (тестовых сигналов), получение и анализ ответных реакций. Системы диагностирования применяются на этапе производства, в процессе эксплуатации объекта и позволяют немедленно реагировать на нарушения в работе объекта, подключать резервные узлы взамен неисправных, переходить на другие режимы работы. Назначение системы диагностирования еще и в имитации функционирования объекта при его проверке и наладке. В частности, системы функционального диагностирования встраиваются во все электронно-вычислительные машины (ЭВМ).

Программа самопроверки записывается в постоянной памяти машины. После каждого включения последовательно опрашиваются все узлы ЭВМ. В ответ на запрос выдаются сигналы «да» (в исправном состоянии) и «нет» (в неисправном) готовности к работе, итоговая информация о готовности высвечивается на экране после окончания диагностирования.

В свою очередь, ЭВМ могут входить в системы диагностирования самых разнообразных технических (производственных, транспортных, космических и др.) систем. В технологических установках и комплексах устанавливаются датчики давления, температуры,

частоты, размеров и других параметров производственных процессов. Электрические сигналы от датчиков воспринимаются и анализируются ЭВМ, что позволяет поддерживать режимы работы технических систем в заданных пределах и предупреждать аварийные ситуации.

На практике различают следующие *виды технического состояния технологической системы*:

- исправное состояние (все показатели системы соответствуют всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией);
- неисправное состояние (показатели системы не соответствуют хотя бы одному из требований нормативно-технической документации);
- работоспособное состояние (техническая система способна выполнять заданные функции, сохраняя значения показателей, заданные в нормативно-технической документации в установленных пределах);
- неработоспособное состояние (значение хотя бы одного показателя, характеризующего способность системы выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической документации);
- правильное функционирование (система способна выполнять необходимые алгоритмы работы по своему прямому назначению);
- неправильное функционирование (система не способна выполнять необходимые алгоритмы работы по своему прямому назначению).

При решении задач технической диагностики искомыми являются случайные технические состояния системы, а алгоритмы функционирования считаются заданными. При оценке готовности технической системы к выполнению заданных функций, как правило, необходимо различать следующие виды ее технического состояния: исправна или неисправна, работоспособна или неработоспособна, правильно функционирует или неправильно функционирует, с последующим изучением распределения вероятностей этих состояний для входящих в нее функциональных элементов и различных условий ее использования.

В таком простейшем случае техническая система рассматривается как единое целое, а задача технической диагностики сводится к установлению фактов возникновения в ней отказа или сохранения работоспособности, т. е. задача диагностики совпадает с задачей контроля исправности (работоспособности, правильного функционирования) системы в целом.

После установления факта потери системой работоспособности обычно возникает задача определения места появления отказа, т. е. определение отказавшего функционального элемента с целью его замены или ремонта. Эта задача значительно сложнее предыдущей, однако и возможности оптимизации по выбранным критериям процесса поиска отказов здесь значительно шире.

При работе технической системы протекает большое количество разнообразных физических процессов, параметры которых поддаются непосредственному измерению. Кинетика этих процессов в значительной степени зависит как от внешних, так и внутренних факторов. В число первых входят воздействие внешней среды, входные воздействия, поступающие от другой системы. Вторые связаны с технологией изготовления технической системы, ее техническим состоянием, сроком службы, характером взаимосвязей ее функциональных элементов и т. д. При изменении этих факторов изменяется алгоритм функционирования системы, справедливо и обратное утверждение.

Таким образом, техническое состояние технической системы в любой заданный момент времени зависит от сочетания многочисленных обстоятельств, складывающихся как в процессе ее изготовления, так и на этапе эксплуатации. Это приводит к тому, что каждому моменту времени соответствует не одно, а целое множество возможных состояний, в одном из которых может находиться техническая система.

Выходные сигналы функциональных элементов и системы в целом являются носителями диагностической информации. Каждый из этих сигналов зависит от внешних и внутренних факторов и характеризуется определенной совокупностью параметров, поэтому всякие изменения, происходящие в технической системе, сразу же находят свое отражение в изменениях ее выходных сигналов.

Процесс технического диагностирования заключается в измерении и анализе физических параметров элементов технической системы, выходных сигналов ее функциональных элементов или некоторых обобщенных сигналов. Анализ заключается в сопоставлении перечисленных параметров и сигналов с соответствующими возможными состояниями системы, которые должны различаться при технической диагностике. Результат технического диагностирования — решение о принадлежности технической системы одному из классов заранее составленной классификации возможных состояний.

При техническом диагностировании технической системы следует различать *функциональное диагностирование*, когда рабочие воздействия подаются на систему при ее функционировании, и *тестовое диагностирование*, когда на систему подаются тестовые воздействия, которые предназначены только для технического диагноза. При функциональном диагностировании могут применяться режимы работы диагностической системы, имитирующие ее функционирование, такие как форсированные режимы, не исключающие сущность физических процессов, протекающие в системе при нормальных условиях эксплуатации. При тестовом диагностировании должны приниматься меры, позволяющие избежать влияния тестовых воздействий на правильность функционирования системы.

Средства и объекты диагностирования, а также, при необходимости, и обслуживающий персонал, осуществляющий эксплуатацию средств и объекта, составляют систему технического диагностирования. В абстрактном смысле систему диагностирования можно представить в виде множества возможных информационных состояний системы  $S = \{S_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), множества параметров или сигналов  $C = \{C_K\}$  ( $K = 1, 2, \dots, m$ ), несущих информацию о  $S$ , и правил  $P$ , в соответствии с которыми каждому элементу множества  $C$  сопоставляется элемент множества  $S$ . Элементы множеств  $S$  и  $C$  можно рассматривать как векторные величины. Правило  $P$  представляет собой прямую или обратную функцию, отображающее одно множество через другое.

Различают следующие системы технического диагностирования технических систем:

- 1) общие и локальные по степени охвата системой диагностирования;
- 2) внешние и встроенные, универсальные и специализированные по используемым средствам диагностирования;
- 3) автоматические, автоматизированные и ручные.

Объекты технического диагностирования могут быть непрерывные и дискретные.

Для нахождения множества  $S$  информационных состояний и множества  $C$  параметров и сигналов, характеризующих техническую систему, необходимо выбрать модель объекта диагностирования. Модель объекта диагностирования должна быть достаточно абстрактной, чтобы ее можно было применять для решения любых задач

диагностики (проверки исправности объекта, его работоспособности или функционирования, поиска дефекта). В то же время она должна:

- отображать основные зависимости между функциональными элементами;
- учитывать существенные особенности моделируемой системы;
- предусматривать возможности использования различных средств технического диагностирования.

Правило *P*, в соответствии с которым принимается решение о результатах технического диагноза, зависит от выбранного критерия, метода диагностирования. В настоящее время широко используются статистические методы: Байеса, последовательного анализа, статистических решений. Среди других наиболее перспективных методов технического диагностирования можно назвать методы разделения в пространстве признаков, матричные методы и методы распознавания.

### **Структура и оснащение испытательно-диагностического комплекса**

Техническая диагностика технической системы может осуществляться в специальном испытательно-диагностическом комплексе (ИДК) или центре (ИДЦ), структура которого показана на рисунке 19.1. Испытание опытного образца ведется в режиме автоматизированного эксперимента и состоит из последовательных циклов в соответствии с алгоритмом испытания.

Значения выходных параметров определяются с помощью измерительного комплекса и вводятся в ЭВМ, где производятся необходимые расчеты, результаты которых хранятся в памяти машины.

Кроме того, имеется диагностическая аппаратура, с помощью которой оценивается состояние отдельных элементов технической системы или машины, например, их тепловые поля, виброакустические сигналы и другие характеристики.

Для выполнения тех функций, которые отведены измерительно-диагностическому комплексу в общей блок-схеме испытания, его приборное оснащение должно содержать следующую аппаратуру: датчики (преобразователи) первичной информации; усилительно-преобразующую аппаратуру; коммутаторы для запрограммированного опроса показаний отдельных приборов; цифровые измерительные приборы и аналого-цифровые преобразователи; ЭВМ и интерфейсные приборы для связи с объектами, устройства ввода и вывода информации.

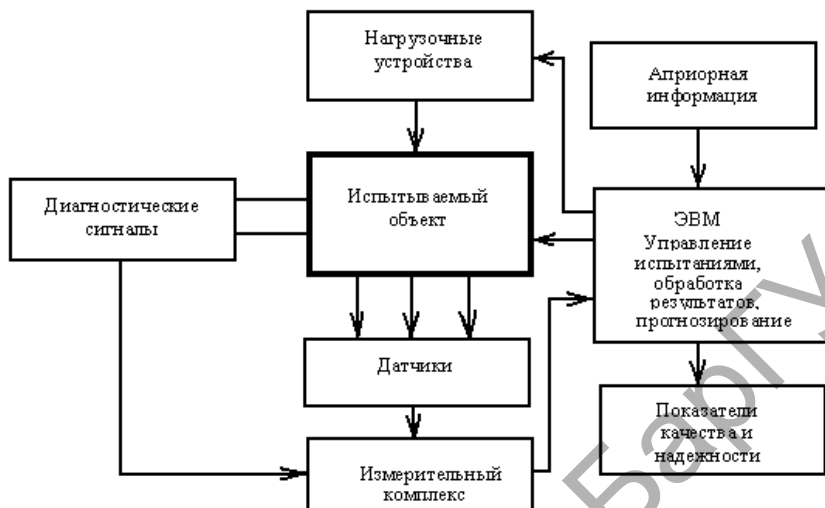


Рисунок 19.1 — Структура испытательно-диагностического комплекса

Таким образом, в ИДК объединена метрологическая, регистрирующая и вычислительная аппаратура, а комплекс выполняет не только измерительно-диагностические, но и информационно-вычислительные функции.

Приборное и компьютерное оснащение комплекса при однотипной его структуре может быть весьма разнообразным.

Параметры и характеристики, измеряемые в процессе стендовых испытаний, отражают специфику машины и уровень требований к ее качеству. Для определения отклонений свойств отдельных элементов от нормы служат методы дефектоскопии.

В последние годы *методы дефектоскопии* (обнаружения дефектов) получили широкое применение в процессе производства и ремонта. Для обнаружения дефектов применяется широкий диапазон методов и средств. Все виды контроля, применяемые для выявления и оценки технологических дефектов, можно разбить на две основные группы: разрушающие и неразрушающие методы [6].

**Разрушающие методы контроля** — это такие методы, как испытание механических свойств, твердости, металлографический анализ, технологические пробы и др. Они приводят к порче одной или

нескольких деталей в партии и не позволяют отделить в партии годные детали от бракованных. Эти методы дают хороший эффект при большой однородности свойств и при возможности периодического отбора экзemplяров изделий или образцов из них для испытаний.

*Неразрушающие методы контроля* позволяют осуществлять сплошную проверку ответственных изделий и полностью гарантировать их бездефектность. Обычно эти методы объединены понятием дефектоскопии, которая базируется на применении физических методов, позволяющих обнаруживать и оценивать внутренние и поверхностные дефекты. К неразрушающим методам контроля относятся и визуальные методы, но они не всегда приемлемы для современного производства.

Например, на крупных металлургических заводах при отсутствии специальных методов контроля сотни людей были заняты наружным осмотром труб или листов, что не только не гарантировало качества, но и вызывало огромные непроизводительные затраты. Применение дефектоскопии во многих случаях обеспечивает решение проблемы контроля качества.

Одним из важных направлений современной дефектоскопии является **интроскопия** — возможность контролировать внутреннее состояние и дефекты изделий, видеть внутри непрозрачных тел и сред.

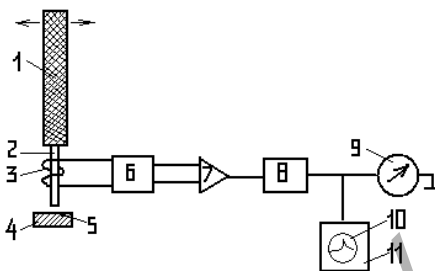
В природе нет полностью непрозрачных (по отношению к различным лучам) тел. Практически для любого объекта можно найти метод просвечивания.

Обычные средства дефектоскопии не позволяют получить полную характеристику дефектов, так как они, как правило, дают одноэлементную информацию, которой недостаточно для выявления формы и размеров дефекта, его ориентации и плотности заполнения.

Для получения данных о реальных дефектах необходима более полная информация о внутреннем строении вещества. Такую многоэлементную информацию можно получить путем использования различных спектров проникающих излучений. Физическая основа интроскопии — взаимодействие проникающих излучений с веществом, в котором они распространяются.

В качестве агента, способного нести многоэлементную информацию о внутреннем строении, составе и свойствах непрозрачных тел и сред, могут быть использованы многие виды оптически сформированных или пространственно распределенных потоков проникающих излучений

(от гамма-квантов высоких энергий до радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, от упругих колебаний высокой частоты до корпускулярных излучений). Возможно использование для тех же целей нейтронных потоков и других частиц с еще более проникающей способностью. Например, для обнаружения трещин используется токовихревой метод, основанный на возбуждении и измерении вторичных электромагнитных полей вихревых токов.



- 1 — рукоятка; 2 — феррит; 3 — катушка;  
 4 — лопатка; 5 — дефект; 6 — генератор  
 высокой частоты; 7 — усилитель;  
 8 — детектор; 9 — измерительный прибор;  
 10 — след дефекта; 11 — осциллограф

Рисунок 19.2 — Схема токовихревого датчика

С помощью специального датчика обнаруживаются поверхностные трещины и другие дефекты (рис. 19.2). Широко применяется ультразвуковой метод, при котором специальным излучателем вводятся ультразвуковые колебания, после отражения улавливаемые приемным устройством. Трещины, раковины рассеивают колебания и уменьшают интенсивность отраженного сигнала.

Находят применение методы рентгенографии с помощью изотопного источника излучения. Такой источник вводится во внутренние полости и на фотопленке, расположенной за просвечиваемой деталью, получается рентгеновское изображение. По снимку можно обнаружить наличие трещин, обрывов, сколов и т. п. Они в меньшей степени поглощают излучение и потому проявляются на пленке в виде затемненных зон.

В некоторых случаях могут быть использованы методы цветной или люминесцентной дефектоскопии. При цветной дефектоскопии детали покрывают краской, проникающей в трещины и поры. Далее слой основной краски смывается, а деталь покрывается другой адсорбирующей краской, на которой в виде штрихов и пятен выступает хорошо заметная основная краска, оставшаяся в трещинах. При люминесцентном методе основная краска обладает свойством флюоресценции при облучении ультрафиолетовыми лучами ртутно-кварцевых ламп. После удаления основной краски (вещества) некоторые частицы

остаются в трещинах и при ультрафиолетовом свете дают четкое свечение на темном фоне поверхности детали. Указанные методы позволяют выявить трещины глубиной порядка 0,01—0,10 мм.

Большие перспективы для неразрушающего контроля имеют голографические методы.

Методы дефектоскопии с успехом применяются также для диагностики различных машин. Применение неразрушающих методов контроля как составной части технологических процессов повышает их надежность, обеспечивает выпуск продукции требуемого качества.

При испытаниях, связанных с оценкой надежности, всегда осуществляется измерение числа циклов или длительности работы машины, а также измерение характеристик процессов (например, износа), приводящих к изменению параметров машины во времени.

Большое значение при испытаниях имеют диагностические процедуры, которые призваны выявить причины и источники тех или иных отклонений от заданных значений.

При осуществлении процесса диагностирования необходимо учитывать информативность того сигнала, который поступает от соответствующего преобразователя.

Большую информацию, чем показания первичного преобразователя, дающего численное значение данного параметра, несет сигнал в виде функциональной зависимости. Такими сигналами могут служить траектории движения рабочих органов машины, законы изменения сил или крутящих моментов за цикл работы механизма, виброакустические сигналы и т. п. Анализ этих функций, спектральный анализ процессов вибраций или акустических сигналов и другие методы оценки функций позволяют из одного сигнала выделить ряд составляющих, характеризующих состояние различных элементов или узлов машины.

Наиболее характерно определение следующих показателей.

*Измерение параметров траекторий* рабочих органов машины — линейных, круговых, точности позиционирования, точности взаимного положения — может осуществляться с применением универсальных измерительных средств. Однако для автоматизированных методов испытания, как правило, желательно осуществлять бесконтактные измерения, когда прибор находится вне рабочей зоны объекта испытания, поэтому наиболее целесообразно применение приборов,

использующих оптические принципы измерения, — автоколлиматоров, лазерных интерферометров, голографических приборов. Свою специфику имеет измерение траекторий точных вращающихся элементов (шпинделя, ротора). Для этих целей создано большое число весьма точной аппаратуры, которая приспособлена для стендовых испытаний.

*Измерение кинематических параметров* — частот вращения, величин перемещения узлов, линейных скоростей, ускорений, передаточных отношений — производится при каждом из выбранных режимов работы машины. Как правило, многие из этих параметров устанавливаются и регистрируются самой системой управления машиной, особенно для оборудования с числовым программным управлением.

Давление в различных полостях машин замеряется с помощью манометров с манометрическими трубками, сильфонами и т. д. Для регистрации быстроизменяющихся процессов применяются датчики давления, использующие пьезоэлектрические, индукционные и тензорезисторные элементы.

Частота вращения измеряется индукционными и фотоэлектрическими тахометрами. Наибольшее распространение получили индукционные тахометры, обладающие высокой точностью измерений и надежностью при длительной эксплуатации. В качестве датчика в индукционном тахометре используется вращающийся ротор миниатюрного генератора переменного тока, запись сигнала производится специальными вольтметрами или электронными частотомерами.

Задачей кинематического контроля является определение величины и спектра кинематической погрешности. Кинематический контроль выявляет отклонения перемещений на выходе механизма по отношению к образцовым, точным движениям, проявляющиеся в виде кинематической погрешности. Результат измерения должен иметь две характеристики: величину погрешности и адрес источника погрешности, т. е. номер ее гармоники. Кинематический контроль заключается в сравнении движения контролируемого механизма с движением точного механизма, образованного датчиками различных типов. Общая схема кинематомера для контроля кинематической погрешности механизмов представлена на рисунке 19.3. Образцовое движение в приборе организуется

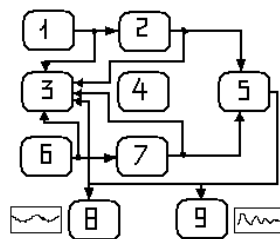


Рисунок 19.3 — Схема кинематомера

датчиками 1 и 6, преобразующими движение входного и выходного звеньев передачи в электрический сигнал. Датчики имеют определенную чувствительность к перемещению, причем при одинаковой чувствительности информационный параметр сигнала, характеризующий перемещение датчика входного звена, будет в  $U$  раз больше сигнала датчика выходного звена. Устройства 2 и 7 предназначены для согласования характеристик датчиков с передаточным отношением контролируемой цепи.

Далее согласованные сигналы с датчиков сравниваются между собой в устройстве 5, выходной сигнал которого в определенном масштабе пропорционален кинематической погрешности. Этот масштаб задает устройство калибровки 4. Выходной сигнал регистрируется самопишущим прибором 8 или спектроанализатором 9. Прибор имеет также устройство контроля 3, позволяющее проверить работу всех его элементов.

Классификация приборов кинематического контроля по типам элементов прибора, по видам контролируемых движений и по используемой измеряемой промежуточной величине представлена на рисунке 19.4 [41].

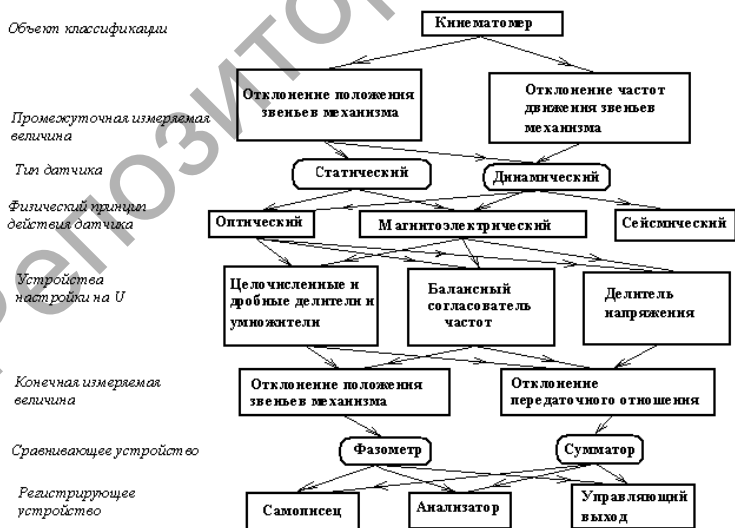


Рисунок 19.4 — Классификация приборов кинематического контроля

*Измерение сил* (рабочих нагрузок, сил и крутящих моментов в приводе, давлений в гидросистемах, напряжений в корпусных деталях, давлений в направляющих и др.) может осуществляться как с применением универсальных средств, так и специальных устройств. Например, при испытании станков широкое применение получили динамометрические столы и устройства для измерения сил резания. Различного рода первичные преобразователи (тензорезисторные, пьезокристаллические и др.) широко используются для этих целей.

*Измерение деформаций и оценка жесткости* элементов машин служит для выявления причин отклонения выходных параметров и той роли, которую играют деформации в суммарной погрешности работы машины. Диагностическую ценность имеют измерения постоянных и переменных деформаций в элементах конструкций в рабочих условиях, поэтому в данном случае измерение деформаций должно осуществляться в процессе испытаний и служить диагностическим сигналом. Для измерений используются тензорезисторы в виде петлевого участка тонкой проволоки с диаметром 0,025—0,05 мм (проволочные тензометры). При растяжении уменьшается поперечное сечение проволоки и возрастает омическое сопротивление, что регистрируется с помощью потенциометрической схемы. Сопротивление тензорезисторов обычно составляет  $\approx 100$  Ом. Тензорезисторы наклеивают на деталь и закрепляют с помощью бумажной ленты, фольги или цемента. При измерении постоянных деформаций тензорезисторы используют до  $400^{\circ}\text{C}$ , так как при более высокой температуре весьма трудно компенсировать температурные погрешности.

При измерении переменных напряжений тензорезисторы могут работать при температуре до  $900^{\circ}\text{C}$ . Точность измерения деформаций составляет 1—5%, величина наибольшей деформации зависит от механических свойств проволоки (при постоянной деформации она составляет несколько процентов, при переменной деформации —  $\approx 0,1\%$ ).

*Измерение вибраций*, когда определяются амплитуды, частоты, фазы колеблющихся элементов машины, оцениваются их спектры, определяются амплитудно-фазовые частотные и другие характеристики, представляет собой специальную широко развитую область исследований. Причинами возникновения вибраций могут быть циклические процессы при работе машины (вращение роторов, периодические нагрузки и т. п.), собственные колебания конструкций и др.

В общем случае каждая точка конструкции имеет пространственное смещение, которое представляет собой геометрическую сумму трех компонентов смещений  $u(t)$ ,  $v(t)$ ,  $w(t)$ . В каждый момент времени вибро смещения могут быть представлены в виде наложения элементарных гармонических колебаний с различной частотой и амплитудой [5]. Обычно в задачах технической диагностики измеряется частота до 30 000 Гц (чаще до 10 000 Гц), виброускорения до  $1\,000\text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ . Структурная схема измерений показана на рисунке 19.5. Датчик преобразует неэлектрические величины (механические перемещения, давления и т. п.) в электрический сигнал. Преобразователь осуществляет первичные преобразования сигнала (фильтрацию и т. п.).

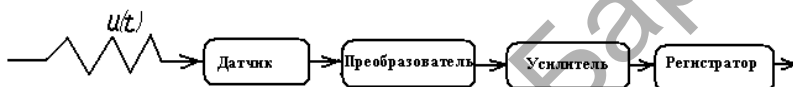


Рисунок 19.5 — Структурная схема измерений

Усилитель и регистратор усиливают и регистрируют сигнал на магнитную или бумажную ленты. Цепь измерения может заканчиваться регистратором или ЭВМ, которая обрабатывает полученную информацию.

В качестве датчиков вибраций используются индукционные и пьезометрические. Последние являются более эффективными, так как имеют небольшие размеры и массу, обладают высокой вибропрочностью и термостойкостью. Вибродатчики закрепляют на детали с помощью фланца, ввертывают в резьбовое отверстие или наклеивают на исследуемую поверхность.

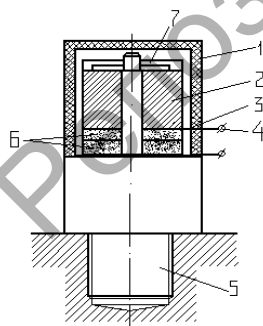


Рисунок 19.6 — Схема пьезометрического датчика

Конструктивная схема пьезометрического датчика показана на рисунке 19.6. Корпус датчика 1 содержит два пьезоэлемента 6, разделенных токосъемной пластиной 3. Пьезоэлемент обладает тем свойством, что под влиянием механического напряжения в нем вырабатывается разность потенциалов.

Давление на поверхности пьезоэлемента создается инерционной массой 2, которая поджимается упругим элементом 7. Датчик закрепляется с помощью резьбового хвостовика 5, сигнал поступает к проводнику 4.

Для устранения динамических погрешностей первая собственная частота датчика должна превышать измеряемую частоту в 4—6 раз.

*Измерение акустических колебаний.* Вибрация элементов машин, происходящая в результате рабочего процесса, собственных колебаний, соударений и т. п., вызывает колебания окружающей среды (воздуха), т. е. служит источником акустических колебаний. В некоторых машинах, например, в авиационных двигателях, мощным источником акустических колебаний (шума) является струя выходящих газов из реактивного сопла, акустическое излучение лопаток компрессора и др.

Акустические колебания, характеризующиеся широким непрерывным спектром с отдельными дискретными составляющими, представляют собой стохастический процесс, амплитуды и частоты которого носят случайный характер.

Состав спектра, его амплитудно-частотная характеристика имеют большое диагностическое значение для состояния машин. Известно, что опытные механики часто «на слух» могут определять характер неисправности двигателя, турбины и т. п.

Естественно, что измерение акустических колебаний, их спектральный анализ повышает ценность акустической диагностики. Для измерения используются микрофоны, основанные на электрических и пьезоэлектрических эффектах с диапазоном частот измерения от 5 до 100 кГц (частота «слышимого» звука — 20 кГц).

Основной трудностью при использовании виброакустических методов является выделение полезного сигнала на фоне помех. Для обнаружения сигналов, несущих диагностическую информацию, используются фильтры.

В последнее время установлено, что при появлении трещины образуется интенсивное акустическое излучение с частотой порядка от 50 до 500 кГц. Это явление может быть использовано для обнаружения трещин.

Вибрации во многом определяют работоспособность объекта. Их применение позволяет выявить резонансные зоны с повышенными амплитудами колебаний.

*Измерение тепловых полей* (температур в различных точках машин, тепловых деформаций, изменение температуры смазки,

колебаний температуры окружающей среды) позволяет оценить причины тренда выходных параметров машины и период тепловой стабилизации системы.

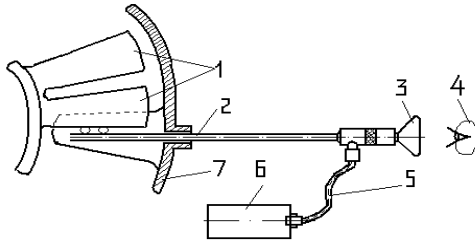
Для измерения температур в различных точках машины в качестве первичных преобразователей используют различные термомпары и терморезисторы. Для анализа всего теплового поля и динамики их изменения обширную информацию могут дать тепловизоры. Их высокая чувствительность к инфракрасному излучению позволяет применить приборы, расположенные на расстоянии нескольких метров от объекта.

Температура в области от минус 200 до плюс 700°C измеряется термометрами сопротивления. Их действие основано на зависимости омического сопротивления от температуры. Для измерения температуры до плюс 1 600°C используются термоэлектрические пирометры, датчиками которых является термомпары. Регистрация показаний температур осуществляется с помощью устройств типа милливольтметров с записью на самописец или в цифровом виде. Для диагностических целей используются также оптические и другие пирометры, регистрирующие излучение нагретых элементов конструкции, в том числе быстровращающихся.

*Регистрация состояния соприкасающихся сред* [5]. Важную диагностическую информацию несет масло, которое используется для смазывания и охлаждения трущихся поверхностей (подшипников, шестерен и т. д.). Диагностический контроль осуществляется по наличию стружки и содержанию железа в масле. Используются специальные приборы (сигнализаторы стружки), которые выдают сигнал при наличии в масле металлических частиц.

Металлические частицы в выхлопных газах могут быть замечены с помощью датчиков, воспринимающих ионизацию среды. Диагностическое значение имеет анализ химического состава выхлопных газов и других продуктов выхлопа.

Визуальные наблюдения осуществляются с помощью оптических трубок (бороскопов). Для визуального наблюдения конструкция должна иметь соответствующие полости, позволяющие проводить осмотр. Применяются оптические трубки, дающие увеличение в 2—3 и более раз, с диаметром поля зрения 3—20 мм. Используются оптические трубки с внутренними зеркалами, позволяющие передать изображение по криволинейному каналу. В последние годы для этой цели используются световоды, выполненные на основе волоконной оптики. Принципиальная схема бороскопа показана на рисунке 19.7.



- 1 — рабочие лопатки, подлежащие осмотру;
- 2 — трубка бороскопа; 3 — окуляр; 4 — глаз наблюдателя; 5 — стекловолоконный кабель;
- 6 — источник света; 7 — корпус компрессора

Рисунок 19.7 — Схема бороскопа

С помощью визуального наблюдения обнаруживают повреждения и разрушения поверхности, коробление, трещины, перегрев, износ и т. п.

На рисунке 19.8 на примере шпиндельного узла многоцелевого станка показана схема диагностирования с использованием информации, которую несут тепловые поля станка [4]. Выходными параметрами системы являются характеристики траектории опорной точки, расположенной на переднем торце ползуна.

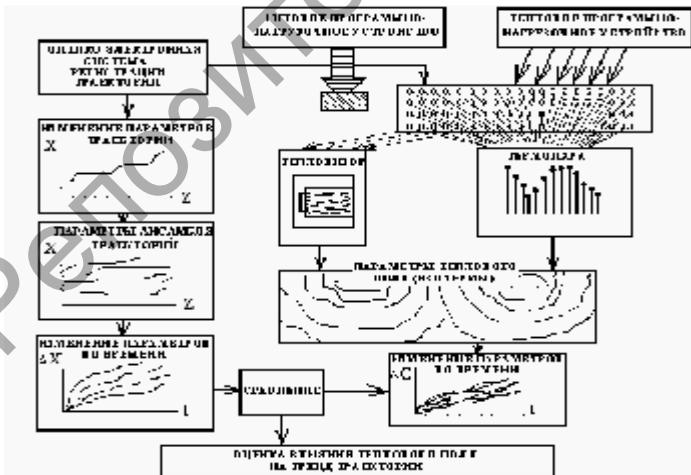


Рисунок 19.8 — Схема диагностирования теплонапряженного шпиндельного узла

Основными источниками тепловыделения являются опоры шпинделя, особенно передняя, направляющие скольжения, приводные механизмы, а также процесс резания. Информация, полученная от термопар, и анализ динамики изменения во времени температур отдельных точек узла позволяет определять параметры теплового поля.

Изменение во времени параметров теплового поля, например, разности  $\Delta\Theta$  температур  $\Theta_{\max}$  и  $\Theta_{\min}$  между наиболее и наименее напряженными точками корпуса ( $\Delta\Theta = \Theta_{\max} - \Theta_{\min}$ ) позволит дать представление о соответствующих тепловых деформациях, а также, при необходимости, измерить их.

Одновременно с этим определяются параметры траектории ползуна, например, при помощи оптико-электронного (лазерного) прибора.

Измеряя параметры каждой реализации траектории, получим характеристику всего ансамбля и, в первую очередь, тренда траектории  $\Delta X$ , который, как правило, связан с тепловыми полями. Сравнение выходных параметров с соответствующими диагностическими сигналами позволяет оценить влияние тепловых полей и установить между ними зависимость — детерминированную или стохастическую. Задачи диагностирования машины пересекаются с задачами, возникающими при ее испытании, однако применение методов диагностирования позволяет сделать испытания машины более информативными и повысить их эффективность.

При программных испытаниях целесообразно применять управляемые нагрузочные устройства для имитации силовых и тепловых нагрузок, действующих на машину. Программные нагрузочные устройства находят применение при испытаниях машин, например, вибраторы при исследовании динамических процессов.

## 20

## ПРИМЕРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

---

Применение диагностики позволяет повысить надежность промышленных изделий, сэкономить значительные средства и ускорить внедрение надежной техники.

## Техническая диагностика авиационных 20.1 двигателей [5]

---

В процессе эксплуатации современных двигателей пассажирских лайнеров контролируется 20—40 параметров, причем показания приборов имеют три уровня информации: индикация в кабине летчика, регистрация на борту самолета, наземные проверки.

В кабину летчика выводятся показания важнейших параметров (например, уровня вибраций двигателей), сведения о которых необходимы для правильного пилотирования самолета. Во всех случаях, когда значения параметров достигают предельно допустимых, используется дополнительная сигнализация (световая или звуковая). Большое количество информации регистрируется на борту самолета с помощью специальных записывающих устройств с последующим хранением информации на магнитных дисках.

Ряд диагностических признаков выявляется при наземной проверке (визуальных осмотрах, проверке фильтров и т. п.). На американском двигателе CF-6 контролируются приблизительно 40 параметров: температура газа за турбиной, температура за компрессором, частоты вращения компрессора и вентилятора, давление за вентилятором и компрессором, вибрация в зонах вентилятора, компрессора и на корпусах подшипников.

Регистрируются количество и температура масла, показания детекторов стружки в откачивающей магистрали, перепад давления на маслофильтре, сигнализатор минимального давления масла. Контролируются параметры топливной системы, системы запуска, отбора воздуха и других систем.

Большинство параметров (давление, уровень вибрации, частота вращения) записываются 1—2 раза за полет и далее направляются в диагностический центр для анализа. В результате анализа и сопоставления с предыдущими показаниями принимается решение о продолжении нормальной эксплуатации либо о дополнительном осмотре, замене детали, узла или снятии двигателя с эксплуатации. В диагностическом центре решение принимается группой специалистов, анализирующих поступающую информацию.

Эквивалентные испытания авиационных двигателей показали, что наибольшие повреждения, особенно деталей горячей части, происходят при работе на наиболее тяжелом (взлетном) режиме. При эксплуатации

процент использования тяжелых режимов в двигателях гражданской авиации различен, он зависит от продолжительности полета и других условий. В некоторых американских авиакомпаниях на двигателях устанавливается счетчик ресурса, учитывающий суммарную длительность наработки на тяжелых режимах и число полетных циклов.

## **20.2 Техническая диагностика судовых механизмов**

В Канаде на ста типах механизмов и электромашин кораблей систематически используется анализатор вибраций. С его помощью обнаруживаются повреждения, вызванные неуравновешенностью, расцентровкой и изгибом валов, неисправности шестерен и подшипников. Состояние определяется с помощью ЭВМ, которая сопоставляет уровень вибраций с прежними значениями и нормами.

На основании статистической информации получены результаты, показывающие зависимость среднего срока службы механизма от уровня вибрации, позволяющие своевременно производить профилактические работы и замены. Указывается, что диагностическая система дает 2 млн дол. экономии, число неисправностей, обнаруживаемых в процессе непосредственной эксплуатации, снизилось на 45%.

## **20.3 Техническая диагностика поршневых двигателей**

Поршневые двигатели (автомобильные, тракторные, стационарные и транспортные дизели) имеют широкое применение. Эксплуатация автомобильных и тракторных двигателей носит массовый характер. Определение технического состояния двигателя без разборки позволяет повысить его надежность и улучшить техническое обслуживание. Следует учесть, что трудоемкость ремонта двигателей массового производства превосходит трудоемкость изготовления в 5—10 раз. Проведение профилактических работ и ремонта «по состоянию» дает значительный экономический эффект. Диагностика осуществляется с помощью передвижных станций, оснащенных виброакустической аппаратурой. Прибор, построенный по схеме диодной матрицы, позволяет различать 33 неисправности

двигателя по 53 признакам. В качестве признаков используются, например, «белый дым», «низкая компрессия», «повышенный расход масла», «стук в момент пуска» и т. п.

## **Применение кинематометров для диагностики 20.4 станков и передач**

---

Для контроля кинематической погрешности приводов станков, зубчатых передач применяются кинематометры различных типов: КН-7У, TOSIMO-JS (Чехия), GPG05 “OPTON” (Германия), РЦ-5, ИЭКДИ-3 и др.

Кинематометр КН-7У является универсальным прибором, который позволяет контролировать кинематическую погрешность цепи обката и подачи зубофрезерных станков всех типоразмеров и классов точности. В комплекте прибора имеются датчики для контроля зубодолбежных станков, зубошлифовальных станков с червячным кругом и различных зубчатых передач.

Датчики имеют различную форму в зависимости от станка, который подлежит исследованию. Датчики устанавливаются на шпинделе изделия станка, на шпинделе инструмента либо на звеньях станков, имеющих поступательное движение. Особенностью датчиков кинематометра КН-7У является установка их непосредственно на рабочие органы станка без дополнительных устройств, что сокращает время проведения контроля. Несоосность датчика и звена станка компенсируется за счет крепления корпуса датчика двухпараллельнограммным устройством, которое позволяет корпусу совершать плоскопараллельное движение без поворота. Датчики, установленные на шпинделе станка, имеют встроенные устройства для устранения торцового биения корпуса при установке на станок.

С помощью кинематометра КН-7У измерялись погрешности малых зубообрабатывающих станков, при этом был определен источник погрешности — карданный вал, соединяющий шпиндель фрезы с валом гитары деления [41].

Измерение накопленной и кинематической погрешности горизонтального RFW-05 и зубодолбежного RS-0S станков фирмы “Schless” (Германия) показало их отклонение от паспортных значений.

Измерение погрешности зубофрезерного станка с работающим дифференциалом показало, что изменение кинематической погрешности за счет взаимодействия погрешностей делительной пары и червячной пары, а также конических шестерен дифференциала вызывало непостоянство накопленной и циклической погрешности за каждый оборот стола. Влияние погрешности уменьшается с увеличением числа нарезаемых зубьев.

С помощью кинематомера КН-У было проверено большое количество зубофрезерных станков 5К324П [41], проверялась погрешность перемещения суппорта фрезы относительно угла поворота входного вала гитары подач, а также кинематическая погрешность цепи подач. Оказалось, что оборотная погрешность от винта подачи при движении суппорта вниз больше погрешности при движении суппорта вверх, что связано с большей жесткостью нижней опоры винта.

Кинематомер КН-У широко применяется для измерения кинематической погрешности и мертвого хода различных редукторов [41]. Измерение кинематической погрешности редуктора не отличается от измерения погрешностей станка. *Порядок действий при измерении мертвого хода* следующий:

- 1) записывают диаграмму кинематической погрешности при вращении выходного вала по часовой стрелке, причем диаграмма должна быть симметрична относительно центральной линии диаграммной бумаги;

- 2) не изменяя положения ручек и тумблера электронного блока, записывают диаграмму кинематической погрешности при вращении выходного вала против часовой стрелки и на ней прочерчивают симметрично линии отметчика новую линию с отметками оборотов;

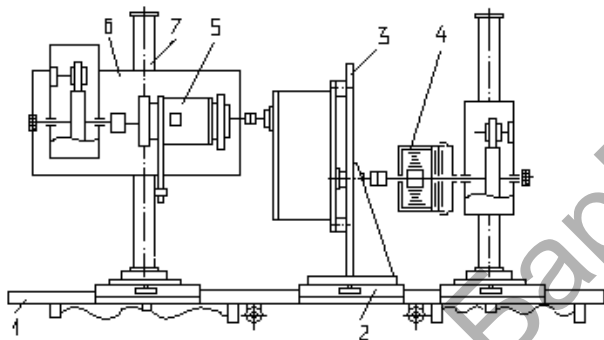
- 3) вторую диаграмму накладывают на первую, повернув ее лицом к первой и развернув на  $180^\circ$  по направлению записи с прочерченной линией отметки на второй записи;

- 4) поле между первой и второй записями соответствует мертвому ходу редуктора.

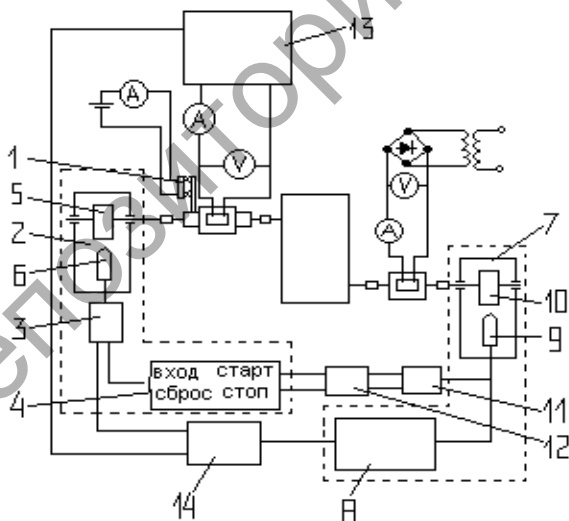
Кинематомер КН-У применялся также для измерения кинематической погрешности волновых редукторов, передач с некруглыми колесами и измерения погрешности соединительных муфт [41].

Для приработки и обкатки мелкомодульных зубчатых механизмов применяется контрольно-спытательная станция [45], которая позволяет производить обкатку мелкомодульных зубчатых механизмов и редукторов в достаточно широком диапазоне скоростей и нагрузок и контроль

параметров, характеризующих качество их изготовления и сборки. Станция состоит из механического и контрольно-измерительного комплексов (рис. 20.1).



а)



б)

а — механический комплекс;

б — контрольно-измерительный комплекс

Рисунок 20.1 — Контрольно-спытательная станция

Механический комплекс представляет собой испытательный стенд, выполненный по схеме разомкнутого силового контура. Он предназначен для получения необходимых скоростей обкатки и нагрузок.

Контрольно-измерительный комплекс включает устройства для измерения момента на входном валу механизма, суммарного свободного хода и неравномерности вращения выходного вала.

Испытуемый механизм крепится на установочной раме 3 (см. рис. 20.1, а), которая смонтирована на каретке 2, зафиксированной в середине станины 1. Две другие каретки с помощью ходовых винтов могут передвигаться по направляющим станины. Приводной двигатель 5 балансирно установлен на плите 6, которая может перемещаться на колонне 7. Нагружение испытуемого механизма осуществляется дисковой фрикционной электромагнитной муфтой 4.

Конструкция механического комплекса позволяет обкатывать механизмы с различным расположением входного и выходного валов. Для измерения вращающего момента на входе испытуемого механизма на станции установлен датчик реостатного типа 1 (см. рис. 20.1, б), изменение сопротивления которого происходит пропорционально углу поворота статора балансирного электродвигателя, соответствующего крутящему моменту на его валу. Устройство для измерения суммарного свободного хода содержит датчик 2, генерирующий импульсы, число которых пропорционально углу поворота вала, усилитель 3 этих импульсов и электронный счетчик 4. В корпусе датчика свободного хода на подшипниках качения установлен вал с насаженным на него диском 5, на периферии которого нанесены магнитные метки, считываемые в процессе измерения магнитной головкой 6.

Устройство для измерения неравномерности вращения выходного вала механизма содержит датчик 7, аналогичный по конструкции датчику свободного хода, и светолучевой осциллограф 8, снимающий в процессе измерения осциллограмму, по которой судят о величине неравномерности вращения выходного вала. Магнитная головка 9 датчика, считывающая импульсы с периферии диска 10, электрически соединена со шлейфом осциллографа, а также с усилителем 11, выходы которого через измерительное реле 12 соединяются с контактами «стоп» и «сброс» счетчика импульсов. При окончании измерения свободного хода, когда начинает вращаться выходной вал механизма, первый же импульс с магнитной головки датчика 7 осуществляет на счетчике операцию «стоп» и затем через определенный промежуток времени операцию «сброс».

Цепь якоря приводного двигателя запитана через магнитно-ранзисторный преобразователь 13, что позволяет изменять частоту вращения якоря в широких пределах. Частота вращения вала двигателя измеряется с помощью датчика и частотомера. Датчик состоит из насаженного на вал двигателя диска с равномерно расположенными на торце шестью сквозными отверстиями и размещенными по разные стороны от диска осветителя и фотодиода.

Контакты «старт» счетчика 4 импульсов, магнитно-ранзисторный преобразователь 13, осциллограф 8 и усилитель 11 электрически соединены с блоком 14 автоматического управления, который обеспечивает следующие режимы работы станции: реверсивную обкатку, нереверсивную обкатку, измерение свободного хода, измерение неравномерности вращения. Коэффициент полезного действия испытуемого механизма измеряется непосредственно в процессе обкатки.

Момент трогания механизма определяется по показаниям приборов, контролирующих напряжение и силу тока в цепи питания приводного двигателя.

Перед началом обкатки на корпусе испытуемого механизма закрепляют вибродатчик и температурные датчики (термопары). Вибрационные характеристики в процессе обкатки снимают с помощью светолучевого осциллографа, а температуру — потенциометром ЭПП-9.

Применение контрольно-спытательной станции на сборочных участках зубчатых механизмов способствует ускорению контроля параметров механизмов в 2—3 раза, повышению надежности и качества контроля, а также позволяет провести приработку и обкатку зубчатых механизмов различных типоразмеров и конструкций, и при необходимости — диагностику.

Технические системы и технологии представляют опасность для человека при их обслуживании, так как современное производство сопровождается загрязнением окружающей среды, во взаимодействии с которой человек живет. При выходе хотя бы одного из функциональных параметров за установленные границы нарушается работоспособность технической системы, т. е. происходит событие,

называемое отказом. В результате этого ТС переходит в неработоспособное состояние.

Проблемы охраны окружающей среды требуют государственного законодательного регулирования, контроля на региональном уровне с участием общественности. Это связано с тем, что однозначное определение источников и размеров экологического ущерба в каждом конкретном случае представляет значительные трудности. Кроме того, обеспечение экологической безопасности производственных процессов и технических средств требует расходов, повышающих их стоимость, и может быть экономически целесообразным только при адекватном возмещении виновниками экологического ущерба, нанесенного окружающей среде.

## **Общие сведения о безопасности технических систем**

### **21.1 систем**

.....

Общие направления повышения безопасности и экологичности технических систем и технологических процессов установлены санитарными нормами и предусматривают:

- замену вредных веществ безвредными или менее вредными;
- замену сухих способов переработки и транспортировки пылящих материалов мокрыми;
- замену технологических операций, связанных с возникновением шума, вибраций и других вредных факторов, процессами или операциями, при которых обеспечены отсутствие или меньшая интенсивность этих факторов;
- замену пламенного нагрева электрическим, твердого и жидкого топлива газообразным;
- герметизацию оборудования и аппаратуры;
- полное улавливание и очистку технологических выбросов, очистку промышленных стоков от загрязнения;
- тепловую изоляцию нагретых поверхностей и применение средств защиты от лучистого тепла.

Важным направлением в защите окружающей среды является разработка малоотходных и безотходных технологий. Такой переход к малоотходным технологиям позволяет осуществлять проектирование

и выпуск технологического оборудования с замкнутыми циклами движения жидких и газообразных веществ. Технологии с рециркуляцией газов внедрены, например, в производстве удобрений, что резко сокращает выбросы вредных веществ в атмосферу.

Все технические средства при вводе в эксплуатацию и ежегодно в период эксплуатации проверяют на соответствие предъявляемым к ним требованиям, контрольно-измерительная аппаратура ежегодно проверяется в специальных лабораториях. Техническое средство, не соответствующее данным технического паспорта и требованиям безопасности, а также не прошедшее своевременную проверку, не допускается к эксплуатации, подлежит ремонту, модернизации или замене и обязательному контролю.

Для обеспечения экологической безопасности технических систем и технологий используется **экобиозащитная техника** — средства защиты человека и природной среды от опасных и вредных факторов.

Основные усилия при создании экобиозащитной техники направлены на локализацию источников негативного воздействия, снижение уровня энергетического воздействия факторов на человека и окружающую среду.

Техногенные аварии и катастрофы происходят по вине неразумной деятельности человека. К ним относится авария на Чернобыльской АЭС. За год происходит около тысячи аварий, где гибнет примерно 1 000 человек. За период с 1992 по 1996 г. пострадало около 3 200 человек.

Выделяют следующие причины аварий:

- грубейшие нарушения требований безопасности руководителей работ;
- ухудшение техники безопасности;
- чрезвычайная ненадежность работающих машин и оборудования из-за износа (до 80%);
- конструктивные недостатки и неисправности оборудования, неверные инженерные решения;
- увеличивающееся количество используемых пожаро- и взрывоопасных технологий.

К аварийно-опасным объектам относятся транспорт, нефтепроводы, газопроводы, угледобывающие шахты, металлургия, химическая, нефтехимическая и микробиологическая промышленность.

**Безопасность** — отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения ущерба.

В последние годы некоторые страны (США, Нидерланды, Швеция) проводят специальные исследования по оценке риска и безопасности производств в крупных промышленных регионах, другие страны предполагают сделать это в будущем. Широкомасштабная оценка безопасности предприятий промышленности в этих странах проводится не для подмены существующего подхода к обеспечению безопасности, а для того, чтобы дополнить его, установить с его помощью более обоснованные критерии. На примере стран Западной Европы [52] видно, что после начала действия механизма реализации мер снижения риска и обеспечения промышленной безопасности количество аварий значительно сократилось.

В настоящее время в России осуществляется переход от регистрации свершившегося факта к осознанию необходимости использования инженерных методов предварительного анализа и исследования технических систем и объектов повышенного риска с целью предупреждения аварий. Встала задача прогнозирования техногенной деятельности для того, чтобы предотвратить тот ее предельный негативный масштаб, превышение которого оборачивается трагедией, катастрофами и экологическим ущербом.

Для технических систем, представляющих опасность при изготовлении или эксплуатации, наиболее значимым из совокупности свойств, входящих в понятие «надежность», является *безотказность*, под которой понимается свойство ТС сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

*Функциональной безопасностью* технических систем будем называть свойство технической системы непрерывно сохранять безопасное состояние в течение некоторого времени или наработки. Свойством безопасности обладает такая техническая система, которая в течение заданного времени не вызывает аварийных и катастрофических ситуаций. Свойство безопасности формируется при проектировании технической системы и раскрывается на последующих этапах ее жизненного цикла (при производстве, испытаниях, упаковке, транспортировке, хранении, монтаже, использовании по назначению, техническом обслуживании и утилизации). Состояние проблемы характеризуется, с одной стороны, все возрастающим вниманием науки и практики, интенсивным поиском эффективных методов

предупреждения аварий и катастроф и, с другой — признанием продолжающегося роста как общего числа аварий, так и их последствий. Современный уровень безопасности технических систем не удовлетворяет предъявляемым требованиям и не страхует от аварий и катастроф. Сложность решения этой глобальной проблемы составляют:

- труднодоступность источников аварии: отказов технических систем, природных явлений и действий человека;
- широкое разнообразие конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов, способствующих аварии и имеющих, как правило, случайную природу;
- сложность многомасштабного и многостадийного процесса разрушения.

Проблема безопасности технических систем, в широком смысле, решается в определенной последовательности этапов, охватывающих стадии проектирования, производства и их эксплуатации.

На первой стадии обычно проводится расчетно-экспериментальная экспертиза проектных решений с учетом результатов моделирования аварийных ситуаций. На стадии производства и эксплуатации разрабатываются технические мероприятия, обеспечивающие оперативную диагностику состояния технических систем.

Функциональная безопасность является сложным свойством, которое включает: электробезопасность, пожаробезопасность, взрывобезопасность, ядерную (радиационную) безопасность, химическую безопасность, экологическую безопасность, сейсмическую безопасность, бактериологическую безопасность и т. д.

Переход ТС из безопасного состояния в опасное происходит в результате опасного события, которое иногда называется происшествием или катастрофой. Опасное событие наступает при превышении ущерба приемлемого значения [52]. Обратный переход технической системы из опасного состояния в безопасное может быть осуществлен лишь после тщательного обследования системы, выявления опасных элементов и их замены на работоспособные безопасные элементы. Опасное событие имеет вероятностный характер. Оно происходит при реализации угрозы наступления опасного события (угрозы безопасному состоянию). Угроза безопасному состоянию (угроза безопасности) представляет собой событие, которое предшествует опасному событию (предвестник опасного события). При появлении угрозы опасное событие может произойти или не произойти. Угроза

безопасности возникает при выходе определенных (критических) параметров за установленные границы, при наличии ошибок операторов, отказов критичных элементов, ошибок в программном обеспечении и т. п. Перечень этих параметров, критичных элементов и ошибок устанавливается для конкретной ТС исходя из анализа процесса функционирования, этапа жизненного цикла, условий эксплуатации и квалификации обслуживающего персонала [50].

Опасность — центральное понятие как сферы безопасности жизнедеятельности в техносфере, так и промышленной безопасности. **Под опасностью** понимаются явления, процессы, объекты, способные в определенных условиях наносить вред здоровью человека, ущерб окружающей природной среде и социально-экономической инфраструктуре, т. е. вызывать нежелательные последствия непосредственно или косвенно. Другими словами, опасность — следствие действия некоторых негативных (вредных и опасных) факторов на определенный объект (предмет) воздействия. При несоответствии характеристик воздействующих факторов характеристикам объекта (предмета) воздействия и появляется феномен опасности (например, ударная волна, аномальная температура, недостаток кислорода в воздухе, токсичные примеси в воздухе и т. п.).

Опасность — свойство, внутренне присущее сложной технической системе. Она может реализоваться в виде прямого или косвенного ущерба для объекта (предмета) воздействия постепенно или внезапно, или резко в результате отказа системы. Скрытая (потенциальная) опасность для человека реализуется в форме травм, которые происходят при несчастных случаях, авариях, пожарах и т. п., для технических систем — в форме разрушений, потери управляемости и т. д., для экологических систем — в виде загрязнений, утраты видового разнообразия и др.

К определяющим признакам опасности относятся: возможность непосредственного отрицательного воздействия на объект (предмет) воздействия, нарушения нормального состояния элементов производственного процесса, в результате которого могут возникнуть аварии, взрывы, пожары, травмы. Наличие хотя бы одного из указанных признаков является достаточным для отнесения факторов к разделу опасных или вредных.

Количество признаков, характеризующих опасность, может быть увеличено или уменьшено в зависимости от целей анализа. Как правило, опасности технического характера обусловлены:

- неисправностью технических средств;
- недостаточной надежностью сложных технических систем;
- несовершенством конструктивного исполнения и недостаточной эргономичностью рабочих мест;
- отсутствием или неисправностью контрольно-измерительной аппаратуры и средств сигнализации;
- сверхнормативным использованием технических систем.

Опасности А. Г. Ветгошкин классифицирует по следующим признакам:

- по природе происхождения (природные, техногенные, антропогенные, экологические, смешанные); производственные опасности (физические, химические, биологические, психофизиологические, организационные);
- по времени проявления отрицательных последствий (импульсивные (в виде кратковременного воздействия, например удар) и кумулятивные (накопление в живом организме и суммирование действия некоторых веществ и ядов));
- по месту локализации в окружающей среде (связанные с атмосферой, гидросферой, литосферой);
- по сфере деятельности человека (бытовые, производственные, спортивные, военные, дорожно-транспортные и т. д.);
- по приносимому ущербу (социальные, технические, экономические, экологические и т. д.);
- по характеру воздействия на человека (активные (оказывают непосредственное воздействие на человека путем заключенных в них энергетических ресурсов); пассивно-активные (активизирующиеся за счет энергии, носителем которой является сам человек, неровности поверхности, уклоны, подъемы, незначительное трение между соприкасающимися поверхностями и др.); пассивные, которые проявляются опосредованно (к этой группе относятся свойства, связанные с коррозией материалов, накипью, недостаточной прочностью конструкций, повышенными нагрузками на оборудование и т. п. Проявляются в виде разрушений, взрывов и т. п.);
- добровольные и принудительные опасности (воздействию опасностей можно подвергаться как добровольно, например, занимаясь горнолыжным спортом, альпинизмом или работая на промышленном предприятии, так и принудительно, находясь вблизи места событий в момент реализации опасностей). Такой подход позволяет

выделять опасности производственные и непроизводственные (риск для населения);

- по структуре (строению) (простые (электрический ток, повышенная температура) и производные, порожденные взаимодействием простых (пожар, взрыв и т. п.)).

- по сосредоточению (сконцентрированные (место захоронения токсичных отходов) и рассеянные (загрязнение почвы осажденными из атмосферы выбросами тепловых электростанций)).

Значительная часть перечисленных выше опасностей не всегда приводит к возникновению происшествий, но усложняет выполнение работ при регламентированной технологии. Процесс развития опасности можно описать следующей логической последовательностью [53]:

- нарушение технологического процесса, допустимых пределов эксплуатации, условий содержания и т. п.;

- накопление, образование поражающих факторов, приводящих к аварии технической системы;

- разрушение конструкции;

- выброс, образование поражающих факторов;

- воздействие (взаимодействие) поражающих факторов с объектом воздействия (окружающей природной средой, человеком, объектами техносферы и пр.);

- реакция на поражающее воздействие.

В зависимости от особенностей технической системы отдельные элементы приведенной цепи могут отсутствовать. Каждому такому событию можно приписать частный показатель в виде вероятности:

- отказа технической системы;

- аварийного исхода;

- образования поражающих факторов;

- поражения объектов воздействия;

- вторичных поражающих факторов;

- воздействия;

- поражения.

Из приведенной последовательности следует, что наличие потенциальной опасности в системе не всегда сопровождается ее негативным воздействием на объект. Любое исключение в цепи ведет к нереализации опасности.

Для реализации опасности необходимо выполнение минимум трех условий: опасность реально действует (присутствует); объект находится в зоне действия опасности; объект не имеет достаточных средств защиты [52].

Любая система эксплуатируется в определенных условиях окружающей среды, испытывает воздействие факторов окружающей среды (климатических, динамических, биологических и др.), факторов нагрузки (режима работы и взаимодействия элементов), а также искусственных факторов (преднамеренного воздействия извне).

Данные факторы могут привести к изменению параметров и состояния работоспособности отдельных элементов, узлов и системы в целом. Такими факторами могут быть [50]:

- 1) перегрузка в результате недооценки действующей нагрузки:
  - снег и непродуманная его расчистка, наледи;
  - производственная пыль;
  - несоответствие фактических масс конструкций запроектированным;
  - ветер;
  - крановая нагрузка;
  - динамические воздействия нагрузки;
  - температурные воздействия;
- 2) потеря устойчивости (общая и местная):
  - ошибки в расчетах, чертежах, нарушение правил производства работ;
  - слабая экспериментальная отработка проектных решений;
  - большая гибкость элементов, эксцентриситет при приложении нагрузки;
  - податливость монтажных стыков, несвоевременная или неправильная анкеровка опор;
  - температурные деформации при неправильном закреплении связей;
  - недостаточная толщина листовых конструкций;
  - искажение геометрических формы конструкций (особенно тонкостенных);
  - неудачное крепление вант, оттяжек;
  - наличие вмятин и местных искривлений;

- 3) неудачные проектные решения и отступления от проекта:
  - неудачный выбор расчетной схемы (несоответствие действительной работе конструкции);
  - низкая точность расчета;
  - недоработка узлов сопряжений;
  - занижение расчетной нагрузки по сравнению с реальной;
  - недооценка жесткости узлов;
  - недостаточная жесткость, прочность, устойчивость;
  - замена одного материала другим;
  - низкая квалификация исполнителей;
  - отсутствие авторского и технического надзора;
  - наличие концентраторов напряжений;
- 4) некачественное изготовление и монтаж конструкций:
  - применение некачественных материалов;
  - низкое качество изготовления конструкций;
  - неправильный выбор способа и порядка монтажа;
  - несвоевременная постановка связей жесткости;
  - некачественная сварка;
  - нарушение технологии сварки в зимнее время;
  - ввод в действие сооружений с существенными недостатками;
- 5) нарушение правил эксплуатации конструкций и сооружений:
  - отсутствие защиты конструкций, работающих в агрессивных средах (резкие температурные колебания и изменения влажности);
  - взрывы, пожары, затопления;
  - вибрации, удары, истирание;
  - отсутствие надлежащего инструментального контроля;
  - перегрузка производственной пылью;
  - увеличение нагрузки без усиления конструкций и регулирования напряжений в них;
- б) усталость, вибрация, коррозия и старение материала:
  - усталостные разрушения;
  - разрушения от старения;
  - вибродинамическое действие кранов, подвижного состава;
  - загрязнение окружающей среды;
  - наличие поверхностных дефектов в конструкциях;

- резкие колебания температуры;
- осадки;
- 7) дефектность оснований, на которые установлены конструкции:
  - неравномерная осадка сооружений, колонн;
  - дефекты кирпичной кладки;
  - наличие перекошенных закладных частей;
  - потеря устойчивости основания;
  - неравномерное промораживание грунта;
  - оттаивание грунта в зоне многолетнемерзлого грунта;
  - пучение грунта;
  - замачивание лесовидных грунтов;
  - блуждающие токи в грунте;
  - агрессивные грунтовые воды;
  - засоленные грунты;
  - дефекты инженерно-геологических изысканий;
- 8) непредвиденные (непрогнозируемые) причины:
  - аварии от провалов, оползней, осыпей, обрушений выше-лежащих конструкций;
  - сейсмические воздействия и извержения вулканов;
  - грозовые разряды, град, падение метеоритов;
  - аварии от биологических вредителей;
  - ураганы, наводнения, цунами, ледоходы, сели;
  - ландшафтные пожары;
  - подмыв фундаментов, переувлажнение оснований.

Опасности — явление, зависящее от многих факторов, поэтому трудно, а иногда и невозможно, рассматривать одни составляющие опасности в отрыве от других. Необходимо иметь представление о том, каких последствий следует ожидать, насколько велика угроза для окружающей природной среды и для общества.

Анализ реальных аварийных ситуаций, событий и факторов и человеческая практика уже сегодня позволяет сформулировать ряд аксиом об опасности технических систем [56]:

**Аксиома 1.** Любая техническая система потенциально опасна. Потенциальность опасности заключается в скрытом, неявном характере и проявляется при определенных условиях. Ни один вид технической системы при ее функционировании не может достичь абсолютной безопасности.

А к с и о м а 2. Техногенные опасности существуют, если повседневные потоки вещества, энергии и информации в техносфере превышают пороговые значения. Пороговые или предельно допустимые значения опасностей устанавливаются из условия сохранения функциональной и структурной целостности человека и природной среды. Соблюдение предельно допустимых значений потоков создает безопасные условия жизнедеятельности человека и исключает негативное влияние техносферы на природную среду.

А к с и о м а 3. Источниками техногенных опасностей являются элементы техносферы. Опасности возникают при наличии дефектов и иных неисправностей в технических системах, при неправильном использовании технических систем. Технические неисправности и нарушения режимов использования технических систем приводят, как правило, к возникновению травмоопасных ситуаций, а выделение отходов (выбросы в атмосферу, стоки в гидросферу, поступление твердых веществ на земную поверхность, энергетические излучения и поля) сопровождается формированием вредных воздействий на человека, природную среду и элементы техносферы.

А к с и о м а 4. Техногенные опасности действуют в пространстве и во времени. Травмоопасные воздействия действуют, как правило, кратковременно и спонтанно в ограниченном пространстве. Они возникают при авариях и катастрофах, взрывах и внезапных разрушениях зданий и сооружений. Зоны влияния таких негативных воздействий, как правило, ограничены, хотя возможно распространение их влияния и на значительные территории, например, при аварии на ЧАЭС.

Для вредных воздействий характерно длительное или периодическое негативное влияние на человека, природную среду и элементы техносферы. Пространственные зоны вредных воздействий изменяются в широких пределах от рабочих и бытовых зон до размеров всего земного пространства. К последним относятся воздействия выбросов парниковых и озоноразрушающих газов, поступление радиоактивных веществ в атмосферу и т. п.

А к с и о м а 5. Техногенные опасности оказывают негативное воздействие на человека, природную среду и элементы техносферы одновременно. Человек и окружающая его техносфера, находясь в непрерывном материальном, энергетическом и информационном

обмене, образуют постоянно действующую пространственную систему «человек — техносфера». Одновременно существует и система «техносфера — природная среда». Техногенные опасности не действуют избирательно, они негативно воздействуют на все составляющие вышеупомянутых систем одновременно, если последние оказываются в зоне влияния опасностей.

**А к с и о м а 6.** Техногенные опасности ухудшают здоровье людей, приводят к травмам, материальным потерям и деградации природной среды.

При анализе обстановки среды деятельности человека вырисовываются как внешние, так и внутренние источники опасности. Внешние источники представлены двумя родами явлений: состояние среды деятельности (техническими системами) и ошибочными, непредвиденными действиями персонала, приводящими к авариям и создающими для окружающей среды и людей рискованные ситуации. При этом разные факторы среды обитания воздействуют неодинаково: если техника и технологии могут представлять непосредственную опасность, то социально-психологическая среда, за исключением случаев прямого вредительства, влияют на человека через его психологическое состояние и дезорганизацию его деятельности.

Внутренние источники опасности обусловлены виктимностью (личными особенностями работающего), которые связаны с его социальными и психологическими свойствами и представляют субъективный аспект опасности (этот аспект более подробно рассматривается психологией безопасности деятельности) [51].

Эксплуатация технических систем потенциально опасна, так как связана с различными процессами, а последние — с использованием (выработкой, транспортировкой, хранением и преобразованием) химической, электрической и других видов энергии, накопленной в оборудовании и материалах, непосредственно в человеке и окружающей среде. Опасность проявляется в результате неконтролируемого выхода энергии, который в определенных условиях сопровождается происшествиями.

Опасности характеризуются потенциалом, качеством, временем существования или воздействия на человека, вероятностью появления, размерами зоны действия.

Потенциал проявляется с количественной стороны (например, уровень шума, запыленность воздуха, напряжение электрического

тока). Качество отражает его специфические особенности, влияющие на организм человека (например, частотный состав шума, дисперсность пыли, род электрического тока).

Применяются численные, балльные и другие приемы оценки опасности. Мерой опасности может выступать и число пострадавших. Известно, например, что каждый добытый 1 млн т угля в бывшем СССР «стоил» жизни одному шахтеру. В настоящее время в России этот уровень приблизился к двум.

Другой мерой опасности может быть и приносимый ее реализацией ущерб для окружающей среды, который только частично может быть измерен экономически (в основном через затраты на ликвидацию последствий).

В теории безопасности и ряде государственных и международных стандартов при формировании критерия вида состояния (опасное или безопасное) используется понятие «ущерб» [59; 10н], который характеризует потерю здоровья или жизни людей, убытки или непредвиденные расходы, урон или вред, который наносится сопрягаемым объектам или окружающей природной среде. Ущерб может иметь характер любого вида: материальный, моральный, природный, политический и т. п. [59]. Приемлемое значение ущерба устанавливается в нормативно-технической документации на определенный период времени в зависимости от состояния (экономического, социального, культурного и т. п.) общества. Безопасным является состояние, в котором ущерб не превышает приемлемого значения. Такой ущерб называется приемлемым [59]. Если ущерб превышает приемлемое значение, ТС находится в опасном состоянии.

Характер потенциальной опасности меняется на всем пути развития человечества от чисто природных, естественных факторов вначале и до многочисленных негативных факторов антропогенного происхождения (высокие скорости и энергии, электрический ток, излучения, высокие температуры и др.) в современном обществе.

Специалисты различных отраслей промышленности в своих сообщениях и докладах постоянно оперируют не только определением «опасность», но и таким термином, как «риск». В научной литературе встречается весьма различная трактовка данного термина, в него иногда вкладываются отличающиеся друг от друга содержания. Например, риск в терминологии страхования используется для обозначения предмета страхования (промышленного предприятия или

фирмы), страхового случая (наводнения, пожара, взрыва и пр.), страховой суммы (опасности в денежном выражении) или же как собирательный термин для обозначения нежелательных или неопределенных событий. Экономисты и статисты, сталкивающиеся с этими вопросами, понимают риск как меру возможных последствий, которые проявятся в определенный момент в будущем.

В психологическом словаре риск трактуется как действие, направленное на привлекательную цель, достижение которой сопряжено с элементами опасности, угрозой потери, неуспеха, либо как ситуативная характеристика деятельности, состоящая в неопределенности ее исхода и возможных неблагоприятных последствиях в случае неуспеха, либо как мера неблагоприятия при неуспехе в деятельности, определяемая сочетанием вероятности и величины неблагоприятных последствий в этом случае [56]. Ряд трактовок раскрывает риск как вероятность возникновения несчастного случая, опасности, аварии или катастрофы при определенных условиях (состоянии) производства или окружающей человека среды.

Приведенные определения подчеркивают как значение активной деятельности субъекта, так и объективные свойства окружающей среды. Общим во всех приведенных представлениях является то, что риск включает неуверенность, произойдет ли нежелательное событие и возникнет ли неблагоприятное состояние. Заметим, что в соответствии с современными взглядами риск обычно интерпретируется как вероятностная мера возникновения техногенных или природных явлений, сопровождающихся возникновением, формированием и действием опасностей, и нанесенного при этом социального, экономического, экологического и других видов ущерба и вреда. Под риском следует понимать ожидаемую частоту или вероятность возникновения опасностей определенного класса, или размер возможного ущерба (потерь, вреда) от нежелательного события, или некоторую комбинацию этих величин. Применение понятия «риск» позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Риск, фактически, есть мера опасности. Часто используют понятие «степень риска» (от англ. level of risk), по сути, не отличающееся от понятия риск, но лишь подчеркивающее, что речь идет об измеряемой величине. Все названные (или подобные) интерпретации термина «риск» используются в настоящее время при анализе опасностей и управлении безопасностью (риском) технологических процессов и производств в целом.

Так, риск для человека пострадать в автомобильной катастрофе составляет  $10 \text{ год}^{-1}$ , от удара молнии —  $10 \text{ год}^{-1}$ . Для современных технических систем повышенной энергетической мощности устанавливается вероятность реализации опасности для человека на уровне не более  $10^{-10} \text{ год}^{-1}$ . Так, например, вероятность тяжелых аварий на АЭС не должна превышать  $10^{-10}$  на 1 реактор-год [46]. Обеспечивается допустимый риск комплексом мероприятий (технических, технологических и организационных), позволяющих свести к минимуму причины возникновения опасности. Особенность анализа технологического риска заключается в том, что в ходе его рассматриваются потенциально негативные последствия, которые могут возникнуть в результате отказа в работе технических систем, сбоев в технологических процессах или ошибок со стороны обслуживающего персонала.

Вполне возможно рассматривать и негативные воздействия на людей, окружающую природную среду при безаварийном функционировании производства (за счет выбросов или утечки вредных или опасных веществ, неочищенных стоков и т. д.).

Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций — результат определенной совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками.

Каждое нежелательное событие может возникнуть по отношению к определенной жертве (объекту риска). Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать индивидуальный, технический, экологический, социальный и экономический риск.

Первопричинами риска могут быть:

- отказы в работе узлов и оборудования вследствие их конструктивных недостатков, плохого технического изготовления или нарушения правил технического обслуживания, отклонения от нормальных условий эксплуатации;
- ошибки персонала, внешние воздействия и пр. Вследствие возможности возникновения указанных причин опасные промышленные объекты постоянно находятся в неустойчивом состоянии, которое по отношению к безопасности производства становится особенно критичным при возникновении аварийных ситуаций на объектах.

Риск возникает при следующих необходимых и достаточных условиях:

- существовании фактора риска (источника опасности);

- присутствию данного фактора риска в определенной, опасной (или вредной) для объектов воздействия дозе;
- подверженности (чувствительности) объектов воздействия к факторам опасностей.

Между авариями в самых разных отраслях можно заметить явное сходство. Обычно аварии предшествует накопление дефектов в оборудовании или отклонения от нормального хода процессов. Эта фаза может длиться минуты, сутки или даже годы. Сами по себе дефекты или отклонения еще не приводят к аварии, но готовят почву для нее. Операторы, как правило, не замечают этой фазы из-за невнимания к регламенту или недостатка информации о работе объекта, так что у них не возникает чувства опасности. На следующей фазе происходит неожиданное или редкое событие, которое существенно меняет ситуацию. Операторы пытаются восстановить нормальный ход технологического процесса, но, не обладая полной информацией, обычно только усугубляют развитие аварии. Наконец, на последней фазе еще одно неожиданное событие (иногда совсем незначительное) играет роль толчка, после которого техническая система перестает подчиняться людям, и происходит катастрофа.

По особенностям источников риска выделяют риски объективные и субъективные, индивидуальные и универсальные, специфические, экологические, транспортные, политические, технические и т. п.

Соответствующие нормативы, гарантирующие безопасное взаимодействие человека с техническими системами и технологическими процессами, установлены для электромагнитных полей, электрического напряжения и тока, излучений оптического диапазона, ионизирующих излучений, химических, биологических и психофизических опасных и вредных факторов.

При разработке технических средств и технологий применяются все возможные меры для снижения опасных и вредных факторов ниже предельно допустимого уровня. Для каждого технического средства разрабатываются правила эксплуатации, гарантирующие безопасность при их выполнении. Для каждой технологической операции также существуют правила техники безопасности.

Анализ риска имеет ряд общих положений независимо от конкретной методики анализа и специфики решаемых задач. Во-первых, общей является задача определения допустимого уровня риска, стандартов безопасности обслуживающего персонала, населения и защиты

окружающей природной среды. Во-вторых, определение допустимого уровня риска происходит, как правило, в условиях недостаточной или непроверенной информации, особенно когда это касается новых технологических процессов или техники. В-третьих, в ходе анализа в значительной мере приходится решать вероятностные задачи, что может привести к существенным расхождениям в получаемых результатах. В-четвертых, анализ риска нужно рассматривать как процесс решения многокритериальных задач, которые могут возникнуть как компромисс между сторонами, заинтересованными в определенных результатах анализа.

Анализ риска может быть определен как процесс решения сложной задачи, требующий рассмотрения широкого круга вопросов и поведения комплексного исследования и оценки технических, экономических, управленческих, социальных, а в ряде случаев и политических факторов.

Анализ риска должен дать ответы на три основных вопроса: что плохого может произойти (идентификация опасностей); как часто это может случаться (анализ частоты); какие могут быть последствия (анализ последствий).

Основной элемент анализа риска — идентификация опасности (обнаружение возможных нарушений), которая может привести к негативным последствиям. Выраженный в наиболее общем виде процесс анализа риска может быть представлен как ряд последовательных событий:

- планирование и организация работ;
- идентификация опасностей;
- выявление опасностей;
- предварительная оценка характеристик опасностей;
- оценка риска;
- анализ частоты;
- анализ последствий;
- анализ неопределенностей;
- разработка рекомендаций по управлению риском.

Первое, с чего начинается любой анализ риска, — планирование и организация работ. Анализ риска проводится в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов для того, чтобы обеспечить вход в процесс управления риском, однако более точный

выбор задач, средств и методов анализа риска обычно не регламентируется. В документах подчеркивается, что анализ опасности должен соответствовать сложности рассматриваемых процессов, наличию необходимых данных и квалификации специалистов, проводящих анализ. При этом более простые и понятные методы анализа следует предпочитать более сложным, не до конца ясным и методически обеспеченным, поэтому на первом этапе необходимо:

- указать причины и проблемы, вызвавшие необходимость проведения риск-анализа;
- определить анализируемую систему и дать ее описание;
- подобрать соответствующую команду для проведения анализа;
- установить источники информации о безопасности системы;
- указать исходные данные и ограничения, обуславливающие пределы риск-анализа;
- четко определить цели риск-анализа и критерии приемлемого риска.

Следующий этап анализа риска — идентификация опасностей. Основная задача — выявление (на основе информации о данном объекте, результатов экспертизы и опыта работы подобных систем) и четкое описание всех присущих системе опасностей. Это ответственный этап анализа, так как невыявленные опасности не подвергаются дальнейшему рассмотрению и исчезают из поля зрения.

Существует целый ряд формальных методов выявления опасностей, о которых речь пойдет ниже. Здесь приводится предварительная оценка опасностей с целью выбора дальнейшего направления деятельности:

- прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей;
- провести более детальный анализ риска;
- выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

Процесс анализа риска может заканчиваться уже на этапе идентификации опасностей.

После идентификации опасностей (при необходимости) переходят к этапу оценки риска.

Последний этап анализа риска технологической системы — разработка рекомендаций по уменьшению уровня риска (управлению риском), если степень риска выше приемлемой.

Результаты анализа риска имеют существенное значение для принятия обоснованных и рациональных решений при определении места размещения и проектировании производственных объектов, при транспортировании и хранении опасных веществ и материалов.

В процессе анализа риска находят широкое применение формализованные процедуры и учет разнообразных ситуаций, с которыми может столкнуться управляющий персонал в процессе своей деятельности, особенно при возникновении чрезвычайной обстановки. Неопределенность, в условиях которой во многих случаях должны приниматься управленческие решения, накладывает отпечаток на методику, ход и конечные результаты анализа риска. Методы, используемые в процессе анализа, должны быть ориентированы, прежде всего, на выявление и оценку возможных потерь в случае аварии, стоимости обеспечения безопасности и преимуществ, получаемых при реализации того или иного проекта.

Существуют четыре различных подхода к оценке риска:

1) инженерный, который опирается на статистику поломок и аварий, на вероятностный анализ безопасности (ВАБ): построение и расчет деревьев событий и деревьев отказов — процесс основан на ориентированных графах. С помощью первых предсказывают, во что может развиться тот или иной отказ техники, а деревья отказов, наоборот, помогают проследить все причины, которые способны вызвать какое-то нежелательное явление. Когда деревья построены, рассчитывается вероятность реализации каждого из сценариев (каждой ветви), а затем — общая вероятность аварии на объекте;

2) модельный, который предполагает построение моделей воздействия вредных факторов на человека и окружающую среду. Эти модели могут описывать как последствия обычной работы предприятий, так и ущерб от аварий на них.

Первые два подхода основаны на расчетах, однако для таких расчетов далеко не всегда хватает надежных исходных данных. В этом случае приемлем другой подход;

3) экспертный, при котором вероятности различных событий, связи между ними и последствия аварий определяют не вычислениями, а опросом опытных экспертов;

4) социологический, при котором исследуется отношение населения к разным видам риска (например, с помощью социологических опросов).

Риск является неизбежным, сопутствующим фактором промышленной деятельности.

Риск объективен, для него характерны неожиданность, внезапность наступления, что предполагает прогноз риска, его анализ, оценку и управление — ряд действий по недопущению факторов риска или ослаблению воздействия опасности. При разработке проблем риска и технологической безопасности самое пристальное внимание уделяется системному подходу к учету и изучению разнообразных факторов, влияющих на показатели риска, именуемому анализом риска. Количественная оценка опасностей называется риском. **Риск** — отношение числа тех или иных неблагоприятных проявлений опасностей к их возможному числу за определенный период времени (год, месяц, час и т. д.).

**Анализ риска, или риск-анализ (risk analysis)** — процесс идентификации опасностей и оценки риска для отдельных лиц, групп населения, объектов, окружающей природной среды и других объектов рассмотрения.

Обычно при инженерной оценке риска его характеризуют двумя величинами: вероятностью события  $P$  и последствиями  $X$ , которые в выражении математического ожидания выступают как множители:

$$R = PX.$$

По отношению к источникам опасностей оценка риска предусматривает разграничение нормального режима работы  $R_h$  и аварийных ситуаций  $R_{ab}$ :

$$R = R_h + R_{ab} = P_h X_h + P_{ab} X_{ab}.$$

Если последствия неизвестны, то под риском понимают вероятность наступления определенного сочетания нежелательных событий:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i.$$

При необходимости можно использовать определение риска как вероятности превышения предела  $x$ :

$$R = P\{\xi > x\},$$

где  $\xi$  — случайная величина.

Техногенный риск оценивают по формуле, включающей как вероятность нежелательного события, так и величину последствий в виде ущерба  $U$ :

$$R = PU.$$

Если каждому нежелательному событию, происходящему с вероятностью  $P_i$ , соответствует ущерб  $U_i$ , то величина риска будет представлять собой ожидаемую величину ущерба  $U^*$ :

$$R = U^* = \sum_{i=1}^n P_i U_i.$$

Если все вероятности наступления нежелательного события одинаковы ( $P_i = P, i = 1, n$ ), то следует

$$R = P \sum_{i=1}^n U_i.$$

Когда существует опасность здоровью и материальным ценностям, риск целесообразно представлять в векторном виде с различными единицами измерения по координатным осям:

$$\overset{\cdot}{R} = \overset{\cdot}{U} \overset{\cdot}{P}.$$

Перемножение в правой части этого уравнения производится покомпонентно, что позволяет сравнивать риски.

Индивидуальный риск можно определить как ожидаемое значение причиняемого ущерба  $U^*$  за интервал времени  $T$  и отнесенное к группе людей численностью  $M$  человек:

$$R = \frac{U^*}{MT}.$$

Общий риск для группы людей (коллективный риск) рассчитывается следующим образом:

$$R = \frac{U^*}{T}.$$

В каждом конкретном случае возникновение опасности в технической системе имеет многопричинный характер. Источниками риска могут быть случайные явления природы, ненадежность технических элементов, неверные решения и запаздывание решений, другие ошибки менеджмента, действия конкурентов, тайна и др.

Именно поэтому представляется возможным классифицировать источники риска на:

1) природные (тайфуны, сильные морозы, землетрясения, дожди, засухи, нашествия насекомых и др.). Эти источники порождают риски, связанные с тем, что в процессе выполнения операции или функционирования системы внешние природные условия выходят за пределы заданных и являются причиной отрицательного отклонения. К природным могут быть отнесены и экологические риски.

**Экологический риск** — возможность нанесения ущерба природной среде в результате загрязнения (либо при нормальной работе, либо при авариях производств) и (или) использования природных ресурсов в результате преобразующей деятельности человека;

2) ненадежность элементов операций и систем. Под надежностью (в широком смысле) понимают способность технического устройства к бесперебойной (безотказной) работе в течение заданного промежутка времени в определенных условиях.

При анализе источников рисков в технике все источники отказов делят на конструктивные (связанные с конструктивными особенностями данного объекта, определяющими режим эксплуатации деталей) и внутренние присущие материалу, из которого изготовлена деталь. Конструктивные причины отказов стремятся устранить в ходе испытаний объекта. Внутренне присущие причины можно снизить выбором или улучшением материала, из которого изготовлена деталь, своевременной профилактикой, заменой деталей и оборудования. Риски, связанные с ненадежностью технических систем, можно снизить в результате испытаний и доработок объектов с целью повышения их качества и надежности. К этой категории рисков относятся и транспортные риски.

**Транспортные риски** — риски, возникающие в процессе перевозок грузов различными видами транспорта (автомобильным, морским, речным, железнодорожным, самолетами, трубопроводами и т. д.);

3) человеческий фактор, который может быть источником риска вследствие действия конкурентов, тайны, конфиденциальности. Все это порождает неопределенность знаний об объекте управления (риск изучения) или ошибочные действия менеджера или оператора (риск действия), конфликты.

Важно подчеркнуть, что сложные и дорогостоящие расчеты довольно часто дают значение риска, точность которого очень невелика. Для сложных технических систем точность расчетов индивидуального риска, даже в случае наличия всей необходимой информации, не выше одного порядка. При этом проведение полной количественной оценки риска более полезно для сравнения различных вариантов (например, размещения оборудования), чем для заключения о степени безопасности объекта. Зарубежный опыт показывает, что наибольший объем рекомендаций по обеспечению безопасности вырабатывается с применением качественных (из числа инженерных) методов анализа риска, позволяющих достигать основных целей риск-анализа при использовании меньшего объема информации и затрат труда.

Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях — и единственно допустимы, в частности, для сравнения опасностей различной природы или при экспертизе особо опасных, сложных и дорогостоящих технических систем.

Исследования безопасности технических объектов показывают, что опасность присуща любым системам и операциям. Практически достичь абсолютной безопасности с технической точки зрения невозможно, а с экономической — нецелесообразно. Это связано тем, что надежность технических систем не может быть абсолютной. Кроме того, возможны отказы вследствие случайных изменений условий эксплуатации с выходом за оговоренные (например, в технических условиях на оборудование) пределы.

Действенным средством для решения проблемы надежности и безопасности является применение автоматики для обеспечения длительного выполнения системой своего служебного назначения в различных условиях эксплуатации.

Не менее значимым является обучение персонала вопросам безопасной эксплуатации технических систем.

Для недопущения отказов конструктивного, производственного и эксплуатационного характера существуют типовые мероприятия, методы и средства предупредительного, контролирующего и защитного характера, обеспечивающие надежность и безопасность технических систем. Их применяют на различных этапах жизненного цикла системы (в процессе проектирования, на последующих стадиях создания и эксплуатации системы).

В связи с необходимостью оценивания показателей безопасности и достаточно обширным диапазоном причин возникновения и последствий угроз проводится их классификация. Один из возможных вариантов такой классификации содержит четыре признака:

1) место появления угрозы, в соответствии с которым угрозы подразделяются на внутренние и внешние. К внутренним угрозам относятся отказы аппаратных средств и ошибки в программном обеспечении ТС. Внешние угрозы являются результатом воздействия на ТС со стороны людей, сопрягаемых объектов и окружающей природной среды;

2) источник появления угрозы, согласно которому выделяются угрозы от следующих факторов:

- вредных (шума, пыли, микроорганизмов, радиации, ультразвука и т. п.);
- электрических (сопротивления изоляции токоведущих частей вблизи органов ручного управления автоматизированной системы, значения напряжения в цепях внешнего источника питания ТС и т. п.);
- термических (сгорания части конструкции, отрыва термоизоляции от корпуса технической системы и т. п.);
- механических (вибрации, ударов и т. п.);
- других, в том числе факторов старения (деградации) электро-радиоизделий, материалов и веществ;

3) последствия угроз, согласно которым все угрозы безопасности делятся на три группы. К первой группе относятся угрозы, последствия от которых связаны с возможностью гибели людей (угрозы аварий и катастроф). Среди угроз аварий выделяются так угрозы несчастных случаев, которые характеризуются различными травмами и потерей трудоспособности людей. Вторую и третью

группы образуют соответственно угрозы нанесения вреда окружающей среде и угрозы экономических потерь;

4) мотивы угроз, в соответствии с которыми угрозы классифицируются на ненамеренные и преднамеренные. Ненамеренными угрозами являются стихийные бедствия, ошибки персонала, обусловленные некомпетентностью или случайным нарушением инструкции по эксплуатации (например, в связи с небрежностью или невнимательностью), отклонения условий эксплуатации от условий, заданных в технической документации, и т. п. Преднамеренные угрозы могут быть обусловлены такими действиями посторонних лиц, в задачу которых входит нанесение вреда окружающей природной среде, здоровью людей или ущерба технической системе или сопрягаемым с ней объектам.

Для защиты ТС от угроз используются специальные средства защиты (барьеры защиты), которые в зависимости от способа их реализации подразделяются на технические, информационные [51], программные и административные. Другим признаком классификации средств защиты является возможность изменения или прекращения процесса решения целевых задач технической системы. В соответствии с этим признаком средства защиты классифицируются на активные и пассивные.

Активные средства применяются в технических системах, которые обладают свойствами самоорганизации и саморегулирования при возникновении угрозы [52]. Такие барьеры предназначены для обнаружения (идентификации) угрозы, оповещения (при необходимости) обслуживающего персонала о появлении угрозы и проведения необходимых операций (действий) для перевода технической системы в защитное (как правило, неработоспособное) состояние, из которого переход в опасное состояние маловероятен (практически исключен).

С помощью пассивных барьеров защиты обеспечивается снижение реализации соответствующего типа возможной угрозы без потери работоспособности ТС. Функционирование пассивного барьера связано только с вызвавшим его работу событием и не зависит от работы другой (активной) системы [52]. Типы барьеров, а также уровень защищенности, которые они обеспечивают, определяются из анализа уязвимых мест (областей) технической системы или ее составных частей, а также значения ущерба, связанного с осуществлением угрозы.

При разработке средств защиты от возможной совокупности угроз целесообразно использовать в качестве показателей безопасности ТС вероятностные характеристики опасного события, например, вероятность того, что в течение некоторого времени  $t$  техническая система будет находиться в безопасном состоянии  $P_B(t)$ , т. е. вероятность отсутствия опасного события [47], которая определяется из выражения

$$P_B(t) = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - P_{zi}(t))], \quad (21.1)$$

где  $P_{zi}(t)$  — вероятность защиты от  $i$ -ой угрозы в течение времени  $t$  (уровень защищенности);

$P_{yi}(t)$  — вероятность появления  $i$ -ой угрозы в течение времени  $t$ ;

$n$  — количество угроз безопасному состоянию ТС.

Поскольку уровень защищенности ТС от угрозы зависит от эффективности и надежности (безотказности) защиты, вероятность  $P_{zi}(t)$  рассчитывается по формуле

$$P_{zi}(t) = P_{zi}^E P_{zi}^{BP}(t), \quad (21.2)$$

где  $P_{zi}^E(t)$  — вероятность защиты от  $i$ -ой угрозы при условии безотказной работы средства защиты (показатель эффективности защиты);

$P_{zi}^{BP}(t)$  — вероятность безотказной работы средства защиты от  $i$ -ой угрозы.

При использовании восстанавливаемого защитного средства вместо вероятности безотказной работы в соотношении (21.2) применяется коэффициент готовности. Наибольшая степень сближения свойств надежности и безопасности происходит в том случае, когда в виде угрозы выступает отказ критичного элемента, который обусловлен только естественным расходом технического ресурса. Вероятность безопасного состояния ТС, в состав которой включено восстанавливаемое средство защиты, обеспечивающее перевод ТС в защитное (неработоспособное) состояние при отказе критичного элемента, находится с учетом формулы (21.1) из выражения

$$P_B(t) = 1 - Q_{00}(t) = 1 - [1 - P_z(t)]q_{kp}(t), \quad (21.3)$$

где  $Q_{00}(t)$  — вероятность опасного отказа ТС;

$q_{kp}(t)$  — вероятность отказа критичного элемента ТС.

Требования по безопасности при этом задаются в виде минимально допустимого значения вероятности  $Q_{00}^{\min}(t)$  опасного отказа в течение времени  $t$ . Тогда на основании выражений (21.2) и (21.3) при известном значении  $q_{kp}(t) \neq 0$ , которое устанавливается в результате анализа структуры ТС на всех режимах ее работы, рассчитывается требуемая вероятность защиты

$$[P_z(t)]_{кр} = 1 - \frac{Q_{00}^{\min}(t)}{q_{kp}(t)} = [P_z^E P_z^{BP}(t)]_{кр}. \quad (21.4)$$

При условии использования идеального средства защиты, у которого показатель эффективности  $P_z^E = 1$  требуемое значение вероятности безотказной работы защитного средства ТС, исходя из заданного значения показателя безопасности, находится с помощью соотношения

$$[P_z^{BP}(t)]_{кр} = 1 - \frac{Q_{00}^{\min}(t)}{q_{kp}(t)}, \quad (21.5)$$

т. е. свойство безопасности ТС при идеальной (в смысле эффективности функционирования) защите определяется только свойствами надежности критичных элементов и средства защиты. Стремление разработчика к высокому уровню эффективности защиты в действительности ведет, как правило, к снижению вероятности безотказной работы разрабатываемого средства, поэтому в процессе разработки ТС с требованиями по безопасности решается задача поиска оптимальной (по критерию максимума уровня защищенности) структуры средства защиты [47].

Опасности технического характера обусловлены:

- неисправностью технических средств;
- недостаточной надежностью сложных технических систем;

- несовершенством конструктивного исполнения и недостаточной эргономичностью рабочих мест;
- отсутствием или неисправностью контрольно-измерительной аппаратуры и средств сигнализации.

В процессе своей деятельности человек имеет дело с высокими уровнями энергии (электрической, тепловой, механической, радиационного и электромагнитного излучения) и вредных веществ. Возможность неконтролируемого выхода энергии, накопленной в материалах и технических системах, значительно усиливает их опасность. На практике разрабатываются и применяются различные методы моделирования опасных ситуаций.

Оценка вероятности опасных ситуаций в системе «человек — техническая система» на стадии проектирования производства, технологий и технических систем позволяет повысить их безопасность.

Для этой цели разрабатываются программы исследований факторов риска, испытания технических средств на соответствие требованиям безопасности.

В случае невозможности надежного теоретического анализа применяются экспертные оценки. Методы экспертного оценивания используются при исследовании достаточно сложных объектов, когда имеются трудности в создании достоверных моделей функционирования больших систем. Эти трудности могут возникнуть из-за сложности и трудоемкости решения задач оптимизации, а также, как это часто бывает, из-за совмещения в технических решениях принципов различных областей науки. Эксперты являются специалистами в конкретных областях знания и могут указать более предпочтительные варианты решений. Для обеспечения объективности оценки разработаны способы получения экспертной информации: парные и множественные сравнения, ранжирование, классификации. Экспертам предъявляются пары или множество объектов, предлагается указать более предпочтительные из них, а при ранжировании — упорядочить по предпочтениям множество объектов. Эксперт может дать количественную оценку предпочтения. Анализ и обработка экспертной информации проводится с помощью математических методов.

Применяя различные методы, можно проводить систематические исследования на стадии проектирования и входе эксплуатации как целого предприятия, так и отдельной технической единицы.

Проверка качества проектируемых технических средств проводится испытанием опытных образцов, а затем, в процессе эксплуатации, периодическими испытаниями серийных образцов в условиях, приближенных к реальным условиям максимальных негативных воздействий (механических, климатических и др.). Эти условия создаются с помощью вибростендов, климатических камер и т. д. Выявление, анализ и устранение дефектов повышает надежность технологий и технических систем. Классификации отказов на этапе проектирования и производства позволяют определить факторы, имеющие преобладающее значение в формировании причин опасных ситуаций. Анализ причин появления опасности для человека при его взаимодействии с техническими системами позволяет выделить причины (организационные и технические). Для устранения организационных причин совершенствуются технологический процесс, уточняются процедуры подготовки и контроля операторов. При этом техническая система рассматривается как замкнутая система, взаимодействующая с окружающей средой.

В этом случае под окружающей средой понимается комплекс условий на каждом этапе жизненного цикла системы. В комплекс условий включаются все возможные факторы, воздействующие на систему, в том числе профессионализм конструкторов, технологические факторы производственного процесса изготовления, режимы эксплуатации (электрические, тепловые и др.).

Объективной закономерностью является то, что при переходе от этапа к этапу в жизненном цикле технической системы количество воздействующих на систему факторов возрастает, увеличивается и степень жесткости их влияния. Это ведет к уменьшению надежности и увеличению опасности в цепочке «человек — техническая система — окружающая среда», что делает задачу обеспечения безопасности технических систем чрезвычайно сложной. Опасности носят потенциальный, т. е. скрытый характер.

**Под идентификацией** (от лат. *indenticico*) понимается процесс обнаружения и установления количественных, временных, пространственных и иных характеристик, необходимых и достаточных для разработки профилактических и оперативных мероприятий, направленных на обеспечение нормального функционирования технических систем и качества жизни.

В процессе идентификации выявляются номенклатура опасностей, вероятность их проявления, пространственная локализация (координаты),

возможный ущерб и другие параметры, необходимые для решения конкретной задачи.

Методы обнаружения опасностей делятся на:

- инженерный, с помощью которого определяют опасности, имеющие вероятностную природу происхождения;

- экспертный, направленный на поиск отказов и их причин. При этом создается специальная экспертная группа, в состав которой входят разные специалисты, дающие заключение;

- социологический, применяемый при определении опасностей путем исследования мнения населения (социальной группы). Формируется путем опросов;

- регистрационный, заключающийся в использовании информации о подчете конкретных событий, затрат каких-либо ресурсов, количестве жертв;

- органолептический, при котором используют информацию, получаемую органами чувств человека (зрением, осязанием, обонянием, вкусом и др.). Примерами использования данного метода являются внешний визуальный осмотр техники, изделия, определение на слух (по монотонности звука) четкости работы двигателя и пр.

Условия, при которых реализуются потенциальные опасности, называются причинами. Они характеризуют совокупность обстоятельств, благодаря которым опасности проявляются и вызывают те или иные нежелательные события (последствия).

Формы нежелательного последствия различны — травмы, материальный ущерб, урон окружающей среде и др.

«Опасность — причина — нежелательные последствия» — логический процесс развития, реализующий потенциальную опасность в реальное нежелательное последствие. Как правило, этот процесс является многопричинным.

Экологические показатели определяют уровень вредных воздействий на окружающую среду при эксплуатации, производстве, потреблении и транспортировании продукции. К ним следует отнести содержание вредных компонентов, выбрасываемых в окружающую среду, вероятность выбросов вредных компонентов (газов, жидкостей, различных излучений и т. д.),

При оценке безопасности используют теорию катастроф, впервые предложенную как эволюционную теорию еще два столетия назад. Для теории катастроф интеграция различных наук является необходимым

условием для формирования ее физических основ. Катастрофа в большинстве случаев представляет собой уникальное явление с причинно-следственным комплексом, описываемым многими науками, основанными на разных принципах и законах. Имеющиеся, в связи с этим, несоответствия и противоречия между фундаментальными теориями не позволяют, во многих случаях, решать задачи диагностики и предупреждения катастроф. Катастрофы, несмотря на кажущиеся различия, во многих случаях можно представлять как локальное возмущение среды, проявляющееся в виде концентрации энергии и внезапного ее освобождения (сброса) при определенных условиях.

Общая теория катастроф необходима как основа для их диагностики и предупреждения.

Теория катастроф (в настоящее время) — это раздел прикладной математики, ветвь теории бифуркаций, важный инструмент для исследования динамических систем. Теория катастроф претендует на осмысление сущностных характеристик реальности, так как рассматривает процессы, в которых основное изменение параметров системы прерывается их скачкообразным изменением, после чего система оказывается в другом режиме существования или разрушения. Теория катастроф, как и теория синергетики, является частью теории самоорганизации технических систем. Метод теории катастроф, например, используется для оценки и анализа устойчивости и управляемости авиационной транспортной системы (АТС), которая является чрезвычайно сложной, состоящей из большого числа функциональных подсистем, обладающей иерархичностью управления, стохастичностью, адаптивностью и самоорганизацией [58].

Основным звеном АТС является система «экипаж — воздушное судно — среда», которая обеспечивает основную задачу по использованию воздушного судна по назначению. Авиационно-транспортная система относится к открытым системам со слабыми обратными связями и, как следствие, является потенциально опасной. Требования к устойчивости и управляемости АТС высоки. Сбой в любом звене данной системы может привести к авиационному происшествию (АП).

С позиции обеспечения безопасности полетов АТС можно разделить на функциональные подсистемы (рис. 21.1) [58]. Анализ причин АП показывает, что доминирующими факторами в них являются человеческий и технический. Однако в ряде случаев они являются

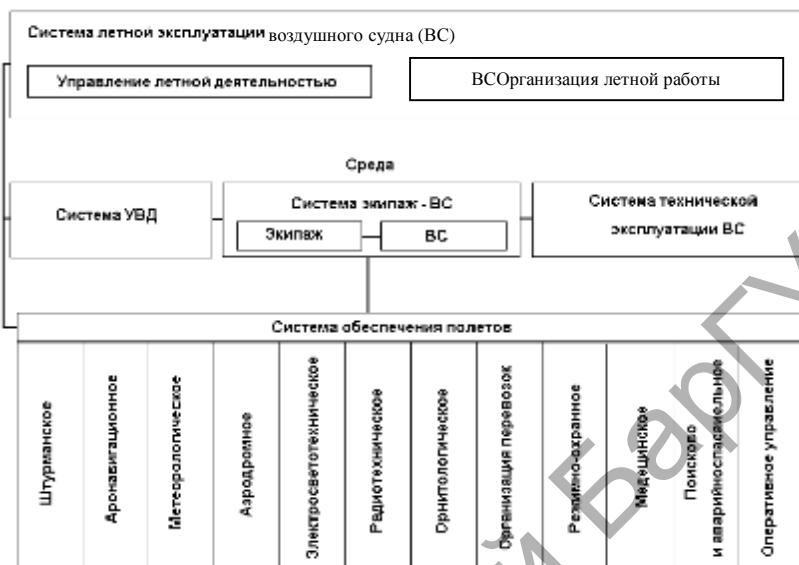


Рисунок 21.1 — Структурная схема АТС [58]

следствием недостатков различных подсистем АТС. Каждой подсистеме АТС соответствует свой процесс функционирования, который направлен на решение главной задачи по обеспечению эффективности и безопасности полетов. Управление процессами производится с помощью стратегий эксплуатации: летной, технической, коммерческой, аэродромной. При этом под стратегией эксплуатации понимается совокупность правил, обеспечивающих заданное управление процессом функционирования соответствующей службы для поддержания наиболее выгодных режимов работы [58].

С практической точки зрения анализ устойчивости режима функционирования АТС чрезвычайно важен. Наблюдая за АТС, мы видим, что выполнение воздушных перевозок и других видов авиационных работ сопровождается потерей устойчивости, которая приводит к АП. На рисунке 21.2 представлен показатель аварийности — количество катастроф на 100 тыс. ч налета ( $K_k$ ) — в целом по парку воздушных судов (ВС) с газотурбинными двигателями (ГТД) за период 1958—2007 гг.

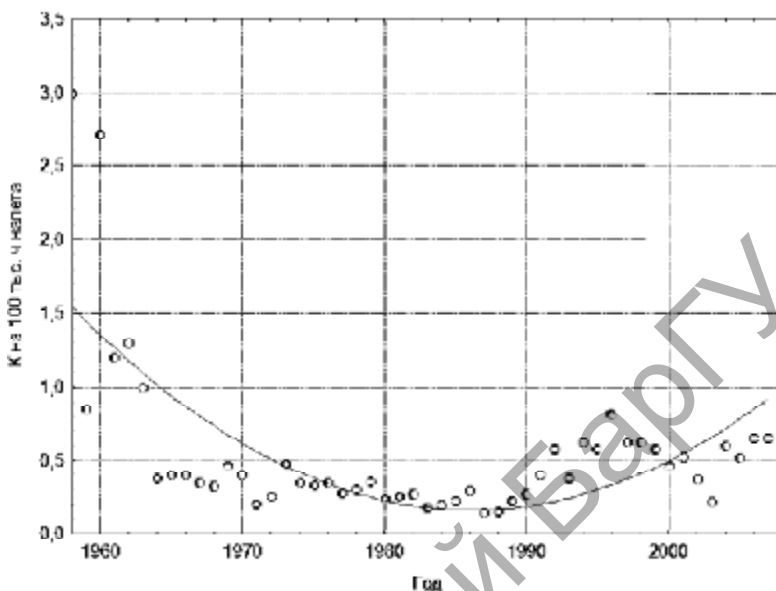


Рисунок 21.2 — Количество катастроф на 100 тыс. ч налета [58]

Зависимость, представленную на рисунке 21.2, можно рассматривать как процесс, развивающийся во времени. Анализ зависимости количество катастроф на 100 тыс. ч налета показывает, что за первые шесть лет эксплуатации ВС с ГТД коэффициент  $K_k$  изменялся хаотично. Такое изменение коэффициента  $K_k$  связано с началом эксплуатации ВС с ГТД, когда АТС для обеспечения полетов не была сформирована.

С 1964 по 1990 г. коэффициент  $K_k$  стабилизировался. Анализ изменения коэффициента  $K_k$  показывает, что он имеет периодическую составляющую. Период изменения коэффициента  $K_k$  составляет примерно 3—4 года. Такое положение можно объяснить многими факторами, основными из которых являются: формирование АТС, установление контроля государства над безопасностью полетов.

В 90-е гг. XX в. произошло ослабление государственного контроля над безопасностью полетов. Новые рыночные отношения подтолкнули к структурным изменениям в АТС. Изменились отношения и в структурных подразделениях АТС. Стали образовываться различные авиакомпании. Все это привело к хаосу.

Из теории катастроф следует, что деградация системы может произойти при следующих общесистемных условиях:

- система затягивает процесс перехода: при увеличении числа новых признаков соответствующего изменения поведения системы не происходит, в результате чего энтропия растет, система перестает выполнять свои функции и дезорганизуется;
- система выбирает неконструктивную ветвь или сценарий развития, например, становится закрытой;
- резко уменьшается количество компонентов, необходимых для функционирования;
- увеличивается количество «балластных» компонентов.

Анализируя изменения показателя  $Kk$  с 1991 г., а также изменения, которые происходят в АТС, можно утверждать, что возникли все необходимые условия для «катастрофы» системы. Иными словами, можно практически однозначно говорить, что старый путь развития АТС закончился, и она находится в точке бифуркации.

**Бифуркация** означает раздвоение и употребляется в широком смысле для обозначения всевозможных качественных перестроек или метаморфоз различных объектов при изменении параметров, от которых они зависят [54].

**Точка бифуркации** — критическое значение при изменении «управляющей» переменной, в котором система выходит из состояния равновесия. В точке бифуркации у системы появляется «выбор», в котором присутствует элемент случайности, приводящий к невозможности предсказать дальнейшее развитие системы. Общая задача исследования точек бифуркации как математическая проблема состоит в их классификации и анализе поведения семейств функций вблизи структурно неустойчивых критических точек. Понятие бифуркации позволяет глубже проникнуть в сущность структурной неустойчивости, выявляя ее следствия.

Таким образом, в процессе движения от одной точки бифуркации к другой происходит развитие системы. В каждой точке бифуркации система выбирает путь развития, траекторию своего движения.

Множества, характеризующие значения параметров системы на альтернативных траекториях, называются **аттракторами**. В точке бифуркации происходит катастрофа — переход системы от области притяжения одного аттрактора к другому. В качестве аттрактора

может выступать и состояние равновесия, и предельный цикл, и странный аттрактор (хаос). Систему притягивает один из аттракторов, и она в точке бифуркации может стать хаотической и разрушиться, перейти в состояние равновесия или выбрать путь формирования новой упорядоченности.

Если система притягивается состоянием равновесия, она становится закрытой и до очередной точки бифуркации живет по законам, свойственным закрытым системам. Если хаос, порожденный точкой бифуркации, затянется, то становится возможным разрушение системы, вследствие чего компоненты системы раньше или позже включаются составными частями в другую систему и притягиваются уже ее аттракторами. Если система притягивается каким-либо аттрактором открытости, то формируется новая диссипативная структура — новый тип динамического состояния системы, при помощи которого она приспосабливается к изменившимся условиям окружающей среды.

Выбор той или иной ветви производится помимо указанных выше закономерностей. Одним из основных законов развития является принцип диссипации, который заключается в следующем: из совокупности допустимых состояний системы реализуется та, которая отвечает минимальному рассеянию энергии, или минимальному росту (максимальному уменьшению) энтропии.

Из зависимости  $K_k$  (см. рис. 21.2) видно, что, если на начальном этапе развития (за семь лет) АТС перешла в устойчивое состояние и появилась новая динамическая система, которая просуществовала до 1991 г., то с этого времени АТС находится в состоянии хаоса. Процесс хаоса затягивается. Появление в нашей АТС иностранной подсистемы, которая является аттрактором, не способствует образованию новой динамической системы. Такое положение вещей приводит по теории к каскаду бифуркаций.

**Каскад бифуркаций (последовательность Фейгенбаума, или сценарий удвоения периода)** — один из типичных сценариев перехода от порядка к хаосу, от простого периодического режима к сложному аperiodическому при бесконечном удвоении периода. Анализ механизмов перехода от порядка к хаосу в реальных системах и различных моделях выявил универсальность относительно немногих сценариев перехода к хаосу. Последний может быть представлен в виде диаграммы бифуркаций. Вхождение

системы в непредсказуемый режим описывается каскадом бифуркаций, следующих одна за другой. Каскад бифуркаций последовательно ведет к появлению выбора между двумя решениями, затем четырьмя и т. д. Система начинает колебаться в хаотическом, турбулентном режиме последовательного удвоения возможных значений.

Теория и практика показывает, что со временем каскад бифуркаций можно остановить, а хаос подавить. Для этого необходимо обратиться к зарубежному опыту или государство должно принять кардинальные меры для решения проблемы безопасности полетов.

Пути обеспечения надежности разнообразны и могут быть связаны с повышением стойкости изделия к внешним воздействиям. Например, для механических систем относят методы создания прочных, жестких, износостойких узлов за счет их рациональной конструкции, применения материалов с высокой прочностью, износостойкостью, антикоррозийностью, теплостойкостью и т. д.

Другой путь обеспечения достаточной надежности — их изоляция от вредных воздействий: установка машины на фундамент, защита поверхностей от запыления и загрязнения, создание специальных условий по температуре и влажности, применение антикоррозийных покрытий, виброизолирующих устройств и т. д.

Существуют следующие методы повышения безопасности технических систем:

- пространственное или временное разделение;
- воздействие на производственную среду в целях приведения ее характеристик в соответствие с характеристиками, требуемыми для человека (мониторинг, функциональная диагностика);
- воздействие на человека с целью его адаптации к условиям технологического процесса;
- комбинирование пунктов 1—3.

Среди принципов повышения безопасности технических систем выделяют:

- ликвидацию опасности, которая должны быть выявлена, идентифицирована и устранена;
- защиту от опасности (религиозную, защиту расстоянием, временем, экраном).

## Методы прогнозирования функциональной 21.2 безопасности технических систем

---

Методы исследования возможных отказов должны стать хорошим подспорьем для специалистов по инженерной защите окружающей среды или по безопасности жизнедеятельности, а поиск возможных отказов и анализ последствий должен стать распространенной, обычной процедурой при оценке сложных, дорогостоящих и высокорисковых предприятий, технологий и установок.

Важным, с точки зрения повышения безопасности технических систем, является прогнозирование их безопасности на этапе проектирования. Прогнозирование может осуществляться только на основе объективной информации, поступающей из разных источников.

Таковыми методами могут быть:

- мониторинг — постоянное отслеживание количественных и качественных показателей процесса;
- математическое моделирование.

Это дает возможность выйти на болевые точки, не видимые при традиционном методе, выявить причины кризисных явлений.

Изучение причин большого числа техногенных катастроф показало, что необходима разработка методологии управления риском аварий, позволяющая оценить баланс между масштабами возможного ущерба от потенциальных аварий системы и ее технико-экономическими преимуществами.

Осознание обществом этого факта привело к созданию на стадии проектирования современной концепции «приемлемого риска» на основе вероятностных подходов (Н. Расмуссен, Р. Барлоу, В. В. Болотин, В. Н. Крысий, Ю. В. Швыряев, Г. С. Садыхов, Г. В. Дружинин и др.).

**Управление риском** (от англ. risk management) — часть системного подхода к принятию решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности промышленных аварий для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба материальным ценностям и окружающей природной среде.

Для процесса управления риском существует несколько названий как в нашей стране (обеспечение промышленной безопасности), так и за рубежом (“safety management”, “management of process hazards”), которые фактически являются синонимами.

Под этими терминами понимается совокупность мероприятий, направленных на снижение уровня технологического риска, уменьшение потенциальных материальных потерь и других негативных последствий аварий. По сути дела, речь идет о предотвращении возникновения аварийных ситуаций на производстве и мерах по локализации негативных последствий в тех случаях, когда аварии произошли. Особенностью этого направления является комплексность, включающая в себя различные аспекты (технические, организационно-управленческие, социально-экономические, медицинские, биологические и др.).

Общим в оценке риска и управление им является то, что они — два аспекта, две стадии единого процесса принятия решения (в широком смысле слова), основанного на характеристике риска.

Такая общность обусловлена их главной целевой функцией — определением приоритетов действий, направленных на уменьшение риска до минимума, для чего необходимо знать как его источники и факторы (анализ риска), так и наиболее эффективные пути его сокращения (управление риском) [53].

Основное различие между двумя понятиями заключается в том, что оценка риска строится на фундаментальном, естественнонаучном и инженерном изучении источника (например, химического объекта) и факторов риска (например, загрязняющих веществ с учетом особенностей конкретной технологии и экологической обстановки) и механизма взаимодействия между ними. Управление риском опирается на экономический и социальный анализ, а также на законодательную базу, которые не нужны и не используются при оценке риска.

Управление риском имеет дело с анализом альтернатив по минимизации риска, т. е. является, по сути дела, частным случаем класса многокритериальных задач принятия решения в условиях неопределенности. Оценка риска служит основой для исследования и выработки мер управления риском в соответствии с алгоритмом действий.

Заключительная фаза процедуры оценки риска (характеристики риска) одновременно является первым звеном процедуры управления риском.

Для управления риском его необходимо проанализировать и оценить. Количественный показатель риска представляет собой численные значения вероятности наступления нежелательного события или (и) результатов нежелательных последствий (ущерба).

Количественно риск может быть определен как частота реализации опасности.

Изучение статистических данных позволяет выявить частоту возникновения опасных событий. Однако серьезность событий (даже внутри одного класса аварий) может значительно изменяться от события к событию. В этом случае возникает необходимость введения категорий событий (например, события с тяжелыми, средними или легкими последствиями) и рассмотрения частоты каждой из таких категорий.

Последнее достигается приписыванием каждому классу или подклассу показателя риска (числа событий за определенный период времени, деленный на длительность этого периода), имеющего размерность обратного времени. Этот показатель иногда рассматривается как мера «вероятности» возникновения события.

Количественно риск может быть определен как вероятность  $P$  возникновения события  $B$  при наступлении события  $A$  (безразмерная величина, лежащая в пределах 0—1) [57].

Поскольку реализация опасности явление случайное, риск опасности (как бы ни определять его — как частоту или вероятность) есть числовая характеристика соответствующей случайной величины, используемой для описания данной опасности. В качестве простейшего примера возможного формального подхода можно рассмотреть случайную величину  $s$  (длительность периода безаварийной работы промышленного предприятия), областью определения которой служит множество режимов эксплуатации за произвольное (возможно, бесконечное) время.

В этом случае можно явно вычислить функцию распределения этой величины  $Fs(t) = P(s \leq t)$ , предположив ее независимость от предистории функционирования промышленного предприятия (такое предположение является наиболее оптимистичным в отношении уровня безопасности). Хорошо известно, что существует единственное решение, удовлетворяющее сформулированному условию: для  $t > 0$   $Fs(t) = 0$ , для  $t < 0$ , где  $p > 0$   $Fs(t)$  — постоянная; это так называемое показательное распределение. Математическое ожидание  $Ms$  случайной величины  $s$  есть  $Ms = 1/p$ , что позволяет интерпретировать параметр  $p$  как среднюю (ожидаемую) частоту аварий или риск аварий в смысле обсуждаемого определения. Вероятность аварий  $pT$  за период времени, не превосходящий  $T$ , определяется, очевидно, как  $PT = P(s \leq T)$ . Отметим, что всегда  $PT < pT$ , поэтому

неверно часто высказываемое утверждение, что для аварии, риск которой равен  $1/T$ , она обязательно случится за период  $T$  (вероятность такого события равна  $1-e^{-1}$ , т. е. приблизительно 0,632). Более того, даже в этом простейшем случае показательного распределения было бы неверно утверждать, что вероятность аварии  $pT$  за период времени, меньший или равный  $T$ , определяется как произведение частоты аварии  $p$  на этот период  $T$ . Имеет место лишь приблизительное равенство в случае малых рисков, т. е. редких аварий.

Последствие  $Y$  в виде нежелательного события или ущерба может (в соответствии со своей величиной) описываться своими специфическими параметрами. Диапазон при этом может быть весьма широк — от экономических до этических ценностей и человеческих жертв.

Мерой возможности наступления риска служит вероятность его наступления  $P$ . Отсюда следует:  $R = YP$ .

Величина риска определяется как произведение величины нежелательного события на вероятность его наступления, т. е. как математическое ожидание величины нежелательных последствий.

Возможности электронно-вычислительной техники позволяют развивать метод моделирования опасных ситуаций. Моделирование оперирует формализованными понятиями. **Формализация** — упорядоченное и специальным образом организованное представление исследуемых объектов с помощью различных физических и геометрических знаков. Формализации подвергаются статистические данные о происшествиях, структура и закономерности функционирования технических систем [57].

В ГОСТ 19.533-74 представлена методика анализа видов, последствий и критичности отказов технических систем, который проводят с целью [11н]:

- обоснования, проверки достаточности, оценки эффективности и контроля за реализацией управляющих решений, направленных на совершенствование конструкции, технологии изготовления, правил эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта объекта и обеспечивающих предупреждение возникновения и (или) ослабления тяжести возможных последствий его отказов;
- достижения требуемых характеристик безопасности, экологичности, эффективности и надежности;
- выявления возможных видов отказов составных частей и изделия в целом;

- изучения их причин, механизмов и условий возникновения и развития;
- определения возможных неблагоприятных последствий возникновения выявленных отказов;
- проведения качественного анализа тяжести последствий отказов и (или) количественную оценку их критичности;
- составления и периодической корректировки перечня критичных элементов и технологических процессов;
- оценивания достаточности предусмотренных средств и методов контроля работоспособности и диагностирования изделий для своевременного обнаружения и локализации его отказов;
- обосновывания необходимости введения дополнительных средств и методов сигнализации, контроля и диагностирования;
- выработки предложений и рекомендаций по внесению изменений в конструкцию и (или) технологию изготовления изделия и его составных частей, направленных на снижение вероятности и (или) тяжести последствий отказов, оценки эффективности ранее проведенных доработок;
- оценки достаточности предусмотренных в системе технологического обслуживания контрольно-диагностических и профилактических операций, направленных на предупреждение отказов изделий в эксплуатации;
- выработки предложения по корректировке методов и периодичности технического обслуживания;
- анализа правил поведения персонала в аварийных ситуациях, обусловленных возможными отказами изделий, предусмотренные эксплуатационной документацией;
- выработки предложений по их совершенствованию или внесению соответствующих изменений в эксплуатационную документацию при их отсутствии;
- проведения анализа возможных (наблюдаемых) ошибок персонала при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте изделий;
- оценки их возможных последствий;
- выработки предложений по совершенствованию человеко-машинных интерфейсов и введению дополнительных средств защиты изделий от ошибок персонала, по совершенствованию инструкций по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту изделий.

**Критический отказ** — отказ системы или ее элемента, тяжесть последствий которого в пределах данного анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности данного отказа и (или) возможного ущерба, связанного с его возникновением. Критичность отказов при анализе возможных появлений критичных отказов (АВПКО) оценивают с использованием показателей, учитывающих для каждого анализируемого отказа объекта:

- вероятность его возникновения за время эксплуатации;
- условные вероятности наступления всех возможных неблагоприятных последствий отказа, если он может сопровождаться несколькими различными по характеру и тяжести последствиями;
- размер возможного ущерба в результате наступления каждого из ожидаемых последствий отказов.

В общем случае показатель критичности отказа представляет произведение его вероятности на средневзвешенный по условным вероятностям проявления последствий отказа размер ущерба от него, хотя возможно применение иных способов измерения критичности отказов. **Критичный элемент** — элемент системы, в результате отказа которого может отказать система.

В перечни критичных включают элементы [11н]:

- возможная тяжесть последствий отказов которых, оцениваемая качественно или количественно, превосходит допустимый для рассматриваемого объекта уровень;
- отказы которых неизбежно вызывают полный отказ объекта;
- с ограниченным сроком службы (ресурсом), не обеспечивающим требуемой долговечности объекта;
- по которым в момент проведения анализа отсутствуют достоверные данные об их качестве и надежности в рассматриваемых условиях применения и (или) возможных последствиях их отказов.

Для каждого элемента, включенного в перечень критичных элементов, должны быть указаны:

- кодовое обозначение и ссылка на соответствующий рабочий лист АВПКО;
- причины включения в перечень (категория тяжести последствий или значение показателя критичности отказов, другие признаки критичности);
- описание возможных причин и последствий отказов;

– предлагаемые конструктивно-технологические и (или) эксплуатационные меры по минимизации вероятности отказов или по снижению возможной тяжести их последствий;

– предложения по повышению устойчивости объекта к данному виду отказов;

– предложения по проведению дополнительных исследований и испытаний с целью отработки данного элемента и (или) получения необходимых данных по его надежности в рассматриваемых условиях применения;

– технологические процессы, влияние которых на качество и надежность объекта и его элементов в момент проведения анализа неизвестно или недостаточно изучено;

– недоступность или блокировка опасности.

Из анализа требований ГОСТ по АВПКО можно видеть, что объем работы при таком анализе весьма велик и в то же время достоверность анализа не высокая, так как выполнить все требования, описанные в ГОСТ, не всегда возможно. Кроме того, не дается качественная или количественная оценка критичности элементов.

Надежность и безопасность технических систем являются, с одной стороны, самостоятельными свойствами, входящими в понятие «качество», а с другой стороны — достаточно близкими друг другу. Наибольшая степень сближения этих свойств происходит в том случае, когда в виде угрозы безопасному состоянию ТС выступает отказ критичного элемента, который обусловлен только естественным расходом технического ресурса. Такой отказ при отсутствии соответствующих мер защиты может стать опасным.

Именно поэтому предлагается проводить анализ критичности элементов технической системы по методике, описанной в 6—12 главах данной монографии. Определив «слабые элементы», построенные в ряд приоритетности по критерию их надежности, оценим их с точки зрения функциональной безопасности по критериям возможности аварии технической системы, принесения вреда человеку и окружающей среды. Эта безопасность технической системы будет функциональной, потому что она не оценивает влияние действия внешних факторов на техническую систему, а лишь, наоборот, влияние самой технической системы на свою безопасность людей, и окружающей среды.

Из анализа, приведенного в главе 12, получили из всех рассмотренных девяти элементов, наиболее слабые элементы восьмой

и первый. Однако слабыми эти элементы получились по критерию надежности. В связи с тем, что в данном примере элементы обезличены, не имеют конкретной сущности, оценить их безопасность невозможно.

Рассмотрим другой пример. По методике, изложенной в 6—12 главах данной монографии для автомобиля из анализа получим следующий ряд приоритетности по надежности:

$$X_{10}, X_3, X_2, X_4, X_2, X_7, X_8, X_5, X_9, X_6,$$

где  $x_0$  — аккумулятор;

$x_1$  — кузов автомобиля;

$x_2$  — тормозная система;

$x_3$  — двигатель;

$x_4$  — рулевой механизм;

$x_5$  — шаровые опоры;

$x_6$  — шины;

$x_7$  — передняя подвеска;

$x_8$  — задняя подвеска;

$x_9$  — бамперы.

Если рассмотреть эти элементы с точки зрения безопасности самой технической системы, то ряд приоритетности будет следующим:

$$X_3, X_7, X_8, X_2, X_6, X_4, X_5, X_1, X_0, X_9.$$

Если рассматривать эти элементы с точки зрения безопасности обслуживающего техническую систему человека, т. е. водителя автомобиля, то ряд приоритетности будет следующим:

$$X_2, X_7, X_4, X_5, X_6, X_1, X_3, X_8, X_0, X_9.$$

По влиянию на безопасность окружающей среды ряд приоритетности технической системы (автомобиля) будет следующим:

$$X_0, X_3, X_8, X_3, X_9, X_1, X_2, X_7, X_8, X_5.$$

Если оценить суммарную безопасность технической системы на человека, окружающую среду, на саму техническую систему, то ряд приоритетности элементов будет следующим:

X<sub>3</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>7</sub>, X<sub>8</sub>, X<sub>0</sub>, X<sub>6</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>9</sub>.

При оценке элементов по 10-балльной системе элементы получают следующие величины оценок:

Элемент	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>0</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>9</sub>
Оценка в баллах	8,25	7,75	7,75	7,5	7,25	7,0	6,75	6,5	6,0	5,5

Таким образом, наиболее опасным элементом автомобиля с точки зрения безопасности самого автомобиля, человека и окружающей среды является двигатель. На втором месте будут тормозная система и передняя подвеска, на третьем — задняя подвеска. Расчет вероятности безотказного состояния по критичным элементам производится по формуле (21.3).

Подобный анализ позволяет на стадии проектирования выявить наиболее слабые элементы с точки зрения надежности и безопасности, с истечением ресурса произвести тщательную диагностику состояния и контроль данных элементов, по результатам контроля дать рекомендации по ремонту этих элементов или же по их замене на новые, а также рассчитать безотказность ТС.

## Экологическая безопасность технических систем

### 21.3

Ежегодно в России 12—15 тыс. человек становятся инвалидами в результате получения травм на производстве, а на учете состоят свыше 220 тыс. человек, получающих пенсии по трудовому увечью и профессиональному заболеванию. Всего в Российской Федерации сейчас 5,9 млн инвалидов, что составляет 3% населения, т. е. почти каждый тридцатый — инвалид (это почти все население Беларуси или Литвы и Латвии вместе взятых). Рост числа инвалидов сопровождается встречным сокращением населения страны. Вот почему следует считать проблему промышленной и экологической безопасности социально-политической проблемой, требующей своего положительного разрешения [51].

В древние времена люди, занимающиеся собирательством и охотой, были тесно связаны с экосистемой, практически являясь неотъемлемой ее частью. Смерть и увечья людей на этом этапе развития человечества определялись чисто биологическими факторами.

Развитие науки и техники, обусловленное потребностью развития экономики, снижая социально-экономический риск, одновременно привело к появлению новых видов опасности как для здоровья населения, так и для окружающей его среды. Эти опасности техногенного происхождения были вызваны поступлением в окружающую среду отходов промышленного производства, необходимостью участия человека в профессиональной деятельности, обладающей различными источниками неблагоприятного воздействия на его здоровье, и т. д. Таким образом, развитие цивилизации привело к возникновению особых условий существования, совокупность которых можно назвать искусственной средой обитания (техносферой). В настоящее время основными причинами увечий и даже смерти людей являются техногенные причины.

Для ряда опасностей, способных к биоаккумуляции, таких как, например, загрязнители элементов биосферы (тяжелые металлы, ДДТ), существуют определенные пределы, в рамках которых организм способен компенсировать их негативное воздействие.

Именно такой подход заложен в ряд предельно допустимых значений: предельно допустимый уровень (ПДУ), предельно допустимая концентрация (ПДК) и др. Установление значений предельных доз воздействия базируется на подпороговых концентрациях веществ (или иных величин воздействия), при которых не наблюдается сколько-нибудь заметного отклонения или изменения функционального состояния организма, определенного точными и чувствительными физиологическими, биохимическими и патогистологическими методами, принятыми в современных медико-биологических исследованиях.

Исходя из этого предметом регламентирования при оценке влияния опасных и вредных факторов на безопасность жизнедеятельности человека является степень влияния факторов среды или факторов, выделяемых ТС, на характер и уровень изменений функционального состояния, функциональных возможностей организма, его потенциальных резервов, адаптивных способностей и возможностей развития последних.

Для исключения необратимых биологических эффектов устанавливаются нормируемые безопасные и предельно допустимые уровни или концентрации энергетического или биологического воздействия. При определении предельно допустимых значений приходится делать выбор между вероятностью нанести ущерб здоровью человека и экономической выгодой обеспечения более жестких нормативов. Пороговый уровень воздействия опасности существует и для технических систем, строительных конструкций, горно-технических сооружений и т. д. Он характеризуется способностью элементов технических систем, строительных конструкций и т. д. сопротивляться до определенного предела и в течение определенного времени негативным (разрушающим) воздействиям или полезным (рабочим) нагрузкам, сохраняя при этом свои заданные функции. Этот уровень оценивается качественными и количественными характеристиками материала элементов или систем в целом, именуемыми показателями надежности.

На практике необходимый уровень безопасности технических средств и технологических процессов устанавливается системой государственных стандартов безопасности труда (ССБТ) с помощью соответствующих показателей. Стандарты формулируют общие требования безопасности, а также требования безопасности к различным группам оборудования, производственных процессов, требования к средствам обеспечения безопасности труда.

Нормативные показатели безопасности во всех сферах труда разрабатываются в соответствии с санитарными нормами и вводятся посредством соответствующих государственных стандартов. Так, внедрение новой техники увеличило интенсивность шума и вибрации и расширило диапазон частот в ультра- и инфразвуковых частях спектра колебаний, что вызвало необходимость разработки и включения в ГОСТ нормативов допустимых уровней ультра- и инфразвука на производстве.

Несмотря на то, что безопасность рассматривается как одно из свойств надежности, оно выходит за его рамки, поскольку неполнота безопасности может проявляться и в нормальных условиях работы объекта. Примером может служить работа теплоэлектростанций на органическом топливе (угле, сланце, мазуте) с нормальным режимом функционирования котлов, но с выбросами в атмосферу вредных продуктов сгорания в дозах, превышающих допустимые из-за несоответствия качества топлива режимам горения. Этот случай

также можно рассматривать как отказ системы, при котором следует изменить режимы сжигания или работы фильтров.

Традиционный подход к обеспечению безопасности при эксплуатации технических систем и технологий базируется на концепции «абсолютной безопасности» (ALAPA — аббревиатура от “As Low As PracticabLe AchievabLe” — «настолько низко, насколько это достижимо практически»), т. е. внедрении всех мер защиты, которые практически осуществимы. Как показывает практика, такая концепция неадекватна законам техносферы, которые имеют вероятностный характер. Абсолютная безопасность достигается лишь в системах, лишенных запасенной энергии.

Требование абсолютной безопасности, подкупающее своей гуманностью, оборачивается трагедией для людей, потому что обеспечить нулевой риск в действующих системах невозможно, и человек должен быть ориентирован на вероятность возникновения опасной ситуации, т. е. на соответствующий риск.)

Современный мир отверг концепцию абсолютной безопасности и пришел к концепции «приемлемого» (допустимого) риска, т. е. если нельзя создать абсолютно безопасные технологии, обеспечить абсолютную безопасность, то, очевидно, следует стремиться к достижению хотя бы такого уровня риска, с которым общество в данный период времени сможет смириться.

В силу этих обстоятельств в промышленно развитых странах, начиная с конца 70-х — начала 80-х гг., в исследованиях, связанных с обеспечением безопасности, начался переход от концепции «абсолютной» безопасности к концепции «приемлемого» риска. Сегодня степень внедрения этой концепции в практическую деятельность различна во всех странах, а в некоторых из них она уже введена в законодательство. Например, в Нидерландах эта концепция в 1985 г. была принята парламентом страны в качестве государственного закона [56]. Согласно ему вероятность смерти в течение года для индивидуума от опасностей, связанных с техносферой,  $>10^{-6}$  считается недопустимой, а  $<10^{-8}$  — пренебрежимой. «Приемлемый» уровень риска выбирается в диапазоне  $10^{-6}$ — $10^{-8}$  в год, исходя из экономических и социальных причин. Для сравнения: риск смерти человека, равный  $10^{-6}$ , соответствует риску, которому он подвергается в течение своей поездки на автомобиле на расстояние в 100 км или полете на самолете на расстояние 650 км, или, если он

выкуривает  $\frac{3}{4}$  сигареты, или в течение 15 мин занимается альпинизмом и т. д.

В Нидерландах при планировании промышленной деятельности, наряду с географическими, экономическими и политическими картами, используются и карты риска для территории страны. В этих условиях для построения промышленного предприятия и введения его в эксплуатацию проектировщикам требуется количественно определить уровень риска его эксплуатации и доказать правительственным органам приемлемость этого риска.

При лицензировании нового крупного промышленного предприятия также требуется предоставить топографическую карту риска, которому будет подвергаться человек, оказавшийся в зоне расположения этого предприятия. На этой карте должны быть указаны замкнутые кривые равного риска, каждая из которых соответствует следующим численным значениям вероятности смерти индивидуума в течение года:  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-7}$ .

Требования такого же рода предъявлены и к уже действующим предприятиям. Проблема уменьшения риска решается в Нидерландах настолько активно и последовательно, насколько это возможно при нынешнем уровне знаний.

Весьма показательный случай произошел на юго-востоке Голландии, где расположено крупное химическое предприятие, выпускающее до полумиллиона тонн аммиака и акрилонитрита в год и отстоящее от ближайших поселков всего на 200 м. Когда местные власти предложили план застройки местности между поселком и предприятием, по существующим правилам был проведен анализ уровня риска в этой зоне. На территории завода находилось около 35 различных объектов, 10 из которых вносили главный вклад в общую угрозу. Каждый из них был тщательно изучен. Неожиданно обнаружилось, что многие считавшиеся раньше весьма опасными установки на самом деле не играют той роли, которую им приписывали. Зато недооценивалась опасность, связанная с хранилищами аммиака. Выяснилось, что часть новой застройки попадает в зону с высоким уровнем риска. Эксперты дали две рекомендации: руководству завода принять меры по снижению риска, местным властям ограничить строительство на территориях, примыкающих к заводу. Жители поселков с энтузиазмом приняли первую часть рекомендаций и с негодованием — вторую. После обсуждения в парламенте было решено в этот

раз позволить строительство в зоне, где риск не превышает  $10^{-6}$ , но в будущем ориентироваться на линию, на которой риск составит  $10^{-8}$ , т. е. будет пренебрежимо мал.

Основные принципы такой деятельности закреплены в правительственной программе управления риском, которая является составной частью общей программы по защите окружающей среды.

Решение о том, какой уровень риска считать приемлемым, а какой нет, носит не технический, а политический характер и во многом определяется экономическими возможностями страны. Правительство и парламент Нидерландов законодательно установили такие уровни. Максимальным приемлемым уровнем индивидуального риска считается величина  $10^{-6}$  в год. Иными словами, вероятность гибели человека в течение года не должна превышать одного шанса из миллиона.

Пренебрежимо малым считается индивидуальный риск  $10^{-8}$  в год. Для факторов, которые приводят к отдаленным опасным последствиям и не имеют порога действия, приняты эти же нормы.

Если такие факторы сказываются лишь на превышения порога (например, предельно допустимой концентрации вредного вещества), то максимальный приемлемый уровень риска соответствует порогу. Максимальным приемлемым уровнем риска для экосистем считается тот, при котором может пострадать 5% видов биогеоценоза.

Эксперты стараются определить риск всесторонне. Учитывают индивидуальный риск, социальный риск и даже риск для экосистем. Первый задается вероятностью гибели отдельного человека, второй — соотношением между количеством людей, которые могут погибнуть при одной аварии, и вероятностью такой аварии, а третий — процентом биологических видов экосистемы, на которых скажется вредное воздействие. Рассматриваются не только события, приводящие к мгновенной смерти, но и факторы, дающие отдаленные последствия (например, использование пестицидов в сельском хозяйстве или загрязнение окружающей среды). Разработаны сложные комплексы компьютерных программ, способные вычислить вероятность аварии на предприятии, определить величину и характер опасных выбросов, учесть метеорологические условия, рельеф местности, расположение дорог и населенных пунктов и, в конечном счете, построить карту распределения риска.

Существует уровень риска, который можно считать пренебрежимо малым. Если риск от какого-то объекта не превышает такого

уровня, нет смысла принимать дальнейшие меры по повышению безопасности, поскольку это потребует значительных затрат, а люди и окружающая среда из-за действия иных факторов все равно будут подвергаться почти прежнему риску. С другой стороны, есть уровень максимально приемлемого риска, который нельзя превосходить, каковы бы ни были расходы. Между двумя этими уровнями лежит область, в которой и нужно уменьшать риск, отыскивая компромисс между социальной выгодой и финансовыми убытками, связанными с повышением безопасности.

Специалисты из разных стран спорят о том, насколько правильны и объективны используемые в Нидерландах методы расчета, точны их карты, оправдан поиск компромисса между выгодой и безопасностью.

Рядовым жителям (неспециалистам) судить об этом трудно. Зато они чувствуют, что государство не на словах, а на деле заботится об их жизни, так что они могут доверять самому подходу к проблеме — честному и действенному.

Конечно, Нидерланды нужно рассматривать как пример страны, где наиболее широко используются вероятностные методы в практической деятельности по обеспечению безопасности населения от риска при эксплуатации промышленных объектов. В других странах масштабы использования концепции «приемлемого» риска в законодательстве более ограничены, но во всех этих странах существует тенденция к ее все более полному применению. Например, в Германии концепция «приемлемого» риска является основой, на которой развиваются научные основы в области безопасности. Полученные при этом результаты используются для повышения безопасности и минимизации риска, а не для достижения общественного признания определенной технологии.

Ключевым значением в установлении допустимого риска является идея, предложенная Фармером в 1967 г. [53]. Смысл ее заключался в установлении случайной зависимости между средним количеством радиоактивной утечки в атмосферу из ядерного реактора и вероятностью (средней частотой в год) наступления такого события.

Принятую оценку допустимого риска и указанные условия нужно выполнять строго и рассматривать как первый шаг к количественному сравнению. При необходимости в дальнейшем, когда будет накоплено больше опыта, эта оценка может быть изменена.

Установленную оценку допустимого риска не следует, однако, воспринимать как оправданный предел. Она должна служить лишь основой относительной шкалы принимаемых рисков.

Установление уровня приемлемой безопасности и риска представляет довольно сложную задачу. Для ее решения требуется выполнение научного анализа экономических, экологических, демографических и других факторов, определяющих развитие общества, с учетом множества взаимосвязей и взаимозависимостей.

Поскольку границы оправданного риска трудно рационально обосновать, при решении расчетных или эксплуатационных технических задач следует использовать сравнение с риском в аналогичных ситуациях. При наиболее неблагоприятных случаях (правда, чтобы не впасть в крайности) в этом анализе необходимо принимать во внимание, рисуя себе нереальные ужасные картины, здравый смысл. Установленный таким образом крайне неблагоприятный случай угрозы сравнивают по частоте и величине с уже ранее имевшими место аналогичными рисками. При этом важно учитывать, что на частоту влияют как пространственная, так и временная протяженность рассматриваемых явлений. Кроме того, нужно учитывать продолжительность каждого события и степень стабильности исходных параметров.

Сравнение данной рискованной ситуации с возникавшими в прошлом аналогичными ситуациями дает для оценки риска более надежные исходные предпосылки, чем субъективные оценки. Проблема оценки этим, однако, все же не решается. В отдельных случаях можно довольствоваться требованием, чтобы допустимый риск был заведомо ниже риска, ранее имевшего место в аналогичных ситуациях, но в других случаях, особенно при очень высоком уровне затрат, проблема остается все же нерешенной. Желанию четко выделить допустимые границы вероятности реализации нежелательного события препятствуют следующие положения:

- такого рода границы должны быть независимыми от экономических затрат, так же, как аналогичная независимость должна обеспечиваться для достижения безопасности людей и материальных ценностей;
- законодатель должен был бы для подобных границ принимать общее решение, не учитывающее всю специфику частных случаев;

– одно лишь утверждение, что такие границы будут соблюдаться, может освободить принимающего решение от обязанности анализировать ситуацию дальше и еще больше снижать угрозу безопасности людей, а ведь при этом возможны случаи, когда ценой очень небольших затрат опасность может быть еще больше снижена, но этой возможностью пренебрегают, поскольку границы уже установлены;

– утверждение, что определенные границы выдерживаются, предполагает качественное единство данных, что на самом деле недостижимо, так как опасность — явление многоаспектное, при развитии и реализации опасности имеют место проблемы самого различного типа;

– ограничения допустимого риска зависят от времени и меняются с изменениями технических и экономических возможностей общества.

Объекты промышленного производства оказывают негативное химическое, биологическое, физическое и механическое воздействие на все основные компоненты окружающей среды (атмосферный воздух, почву, воду, а также на человека, работающего в этих условиях).

Станочное и машиностроительное оборудование в цехах, а также транспортные устройства являются источниками поступления в атмосферу различных типов газов, таких, например, как диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ), перфторуглероды (ПФУ), гидрофторуглероды (ГФУ), гексафторид серы ( $\text{SF}_6$ ), прекурсоров озона или газов с косвенным парниковым эффектом (оксид углерода ( $\text{CO}$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), летучие неметановые органические соединения (ЛНОС), прекурсоров аэрозолей (диоксид серы ( $\text{SO}_4$ )) и других веществ, образующих тепловой эффект. Опасность для атмосферы воздуха и, в конечном счете, для человека представляют не только продукты, выделяемые при работе оборудования, но и хранящиеся горюче-смазочные материалы в необорудованных помещениях и складах.

Ощутимое влияние на природную среду и людей также оказывают отходы производства и потребления. Они требуют не только значительных площадей для складирования и хранения, но и загрязняют вредными веществами, пылью, газообразными выделениями атмосферу, землю, водотоки и подземные воды.

Экологическая оценка безопасности проектируемой ТС строится на основе системного анализа ее функционирования. Помимо существующих видов оценки (эксплуатационно-технологических, экономических, надежности и т. п.) необходимо проведение экологической оценки безопасности спроектированной технической системы.

При оценке экологической безопасности ТС учитывают выброс в атмосферу оборудованием канцерогенных и токсичных веществ, степень загазованности на рабочем месте, загрязнение воздушного и водного бассейна и почвы.

Таким образом, экологическая оценка безопасности ТС складывается из следующих единичных показателей:

- окиси углерода,  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;
- токсичных веществ,  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;
- запыленности,  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;
- влажности помещения, %;
- теплоизлучения,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^{-3}$ ;
- шума, дВ;
- вибрации, дВ;
- ультразвука;
- электромагнитного и радиоактивного излучения.

В зависимости от специфики производства могут присутствовать и другие вещества в рабочей зоне, которые также нужно учитывать при оценке экологической безопасности.

Содержание вредных веществ (окиси углерода, токсичных веществ) и пыли в воздухе рабочей зоны оборудования определяют в соответствии с *ГОСТ 12.2.002-91 Система стандартов безопасности труда. Техника сельскохозяйственного производства. Методы оценки безопасности* [13н].

Факторами метеорологических условий производственной среды являются: температура воздуха, его относительная влажность, скорость перемещения воздуха и наличие теплоизлучений.

Для обеспечения нормальных условий деятельности человека параметры микроклимата нормируются. Нормы производственного микроклимата установлены *ГОСТ 12.1.005-88 ССПТ Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны* [14н; 15н]. Они едины для всех производств и всех климатических зон.

Параметры микроклимата в рабочей зоне должны соответствовать оптимальным или допустимым микроклиматическим условиям.

Оптимальные условия обеспечивают нормальное функционирование системы без напряжения механизмов терморегуляции. При допустимых микроклиматических условиях возможно некоторое напряжение системы терморегуляции без нарушения здоровья человека.

Параметры температуры, влажности и скорости движения воздуха регламентируются с учетом тяжести физического труда (легкая, средняя и тяжелая работа). Кроме того, учитывается сезон года: холодный период года характеризуется среднесуточной температурой наружного воздуха ниже  $+10^{\circ}\text{C}$  и теплый период — температурой  $+10^{\circ}\text{C}$  и выше.

Для контроля метеоусловий и общего экологического состояния в рабочей зоне используются следующие приборы:

- газоанализаторы для измерения загазованности и наличия вредных веществ в воздухе;
- термометры, термограф и парный термометр;
- актинометр при замерах напряженности излучений;
- психрометр или гидрограф при измерении относительной влажности;
- анемометр или кататермометр для замеров скорости движения воздуха;
- виброметры для измерения вибраций;
- шумомеры для измерения шума и другие приборы для измерения остальных единичных показателей, влияющих на экологическую обстановку.

Измерения следует проводить в период рабочего времени при соблюдении следующих условий:

- вида работы (характерного для данного вида оборудования);
- режима работы;
- относительной влажности воздуха, %.

Оборудование должно быть укомплектовано и подготовлено к работе в соответствии с нормативно-технической документацией. Перед началом измерений оборудование должно проработать на выполнении технологической операции не менее одного часа при загрузке  $(75 \pm 15)$  % от номинальной. Окна, двери цеха или отделения во время измерений должны быть закрытыми, система нормализации микроклимата, предусмотренная в цеху, должна работать в режиме, соответствующем времени года.

Отбор проб воздуха на содержание вредных веществ на рабочем месте производят в зоне дыхания рабочего газоанализатором. При этом проводят не менее пяти измерений или отбирают не менее пяти проб для определения содержания вредных веществ.

Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны оценивают на содержание окиси углерода.

Запыленность измеряют в зоне дыхания рабочего пылемером.

На рабочем месте проводят не менее пяти измерений или отбирают не менее пяти проб для определения пыли в воздухе. Концентрацию пыли в воздухе рассчитывают по формуле

$$K = \frac{(m_2 - m_i)}{v_b \cdot t_b}, \quad (21.6)$$

где  $m_i$  — масса фильтра до начала отбора пробы, мг;

$m_2$  — масса фильтра после отбора пробы, мг;

$v_b$  — скорость протягивания воздуха через фильтр, м<sup>3</sup> / мин;

$t_b$  — время отбора пробы, мин.

Масса привеса фильтра ( $m_2 - m_i$ ) должна быть не менее 1 мг, но не более половины массы фильтра. Перед взвешиванием аналитических фильтров их следует выдержать до опытов и после них при одинаковых температурно-влажностных условиях не менее 30 минут. В необходимых случаях проводят анализ содержания и дисперсного состава пыли.

Определяемое в результате испытаний фактическое значение показателя само по себе есть только информация для получения качества окружающей среды, но еще не сама оценка. Для получения экологической оценки необходимо установить по определенному правилу соотношение между фактическим значением показателя и базовым (требуемым) его значением, т. е. рассчитать относительную характеристику показателя или его уровень (степень близости к требуемому значению), который и будет характеризовать уровень экологического состояния окружающей среды.

Набор единичных показателей и их допустимые значения зависят от характера производства. При оценке экологической безопасности необходимо узнать (в отделе охраны труда предприятия) эти показатели и их допустимые и нормативные (базовые) значения, а затем производить измерения единичных показателей.

Относительные показатели по единичным показателям экологической оценки по отношению к аналогичным единичным показателям определяют по формуле

$$q_i = 1 - \left| \frac{p_i - p_i^b}{p_i^d - p_i^b} \right|, \quad (21.7)$$

где  $q_i$  — относительный показатель по  $i$ -му единичному показателю;  
 $p_i$  — величина  $i$ -го единичного показателя в измеряемой зоне;  
 $p_i^b$  — величина  $i$ -го единичного базового показателя;  
 $p_i^d$  — допускаемое значение  $i$ -го единичного показателя, определяемое по нормативно-технической документации.

Базовой характеристике состояния окружающей среды соответствуют единичные показатели, регламентированные нормативно-технической документацией. Если измеренное значение единичного показателя равно базовому, то этот показатель не включается в комплексный показатель. По найденным значениям относительных показателей определяется комплексный показатель экологической оценки, который изменяется в пределах  $0 \leq K_{\Sigma} \leq 1$  по формуле

$$K_{\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i k_i, \quad (21.8)$$

где  $k_i$  — коэффициент весомости единичного показателя (определяется методом экспертных оценок); если измерения производятся в одном и том же помещении через определенные промежутки времени, то эти коэффициенты будут постоянными для единичного показателя в данных условиях. Для приближенной оценки комплексного показателя на первых порах можно принять коэффициенты весомости при единичных показателях равными 1;

$n$  — количество единичных показателей в экологической оценке.

Значение, полученное по формуле (21.8), характеризует экологическое состояние в зоне измерения, т. е. на рабочем месте.

**Пример.** Измерения в рабочей зоне станка и последующие расчеты по формулам (21.6) и (21.7) дали следующие результаты:

Наименование	$p_i$	$p_i^d$	$p_i^b$	$\Delta p_i$	$\Delta p_n$	$K_\Sigma$
Оксид углерода, мг / м <sup>3</sup>	8 000	5 000	3 000	5 000	2 000	-1,5
Вредные газообразные вещества, мг / м <sup>3</sup>	150	100	40	110	60	-0,83
Токсичные вещества, мг / м <sup>3</sup>	0,4	0,6	0,3	0,1	0,3	-0,67
Запыленность, мг / м <sup>3</sup>	0,6	1,0	0,4	0,2	0,6	-0,67
Средняя температура, °С	15	25	18	-3	7	0,58
Теплоизлучение, °С	80	70	25	55	45	-0,22
Влажность, %	60	70	55	5	15	0,67
Шум, дВ						
Вибрации, мВ						
Ультразвук						
Освещенность, лк	18	25	20	-2	5	-0,6

Значения  $p_i^d$  и  $p_i^b$  взяты из норм [16н, 17н]. Анализ таблицы показывает, что в рабочей зоне наблюдается превышение окиси углерода почти в 1,5 раза выше допустимого значения, а также превышение наличия вредных газообразных веществ. Кроме того, наблюдается превышение запыленности, теплоизлучения и недостаточная освещенность. Расчет экологической безопасности можно будет проводить лишь после того, как удастся снизить содержание в рабочей зоне указанных показателей, поэтому необходимо принять меры для приведения единичных показателей в соответствие с базовыми и допустимыми значениями, указанных в нормативах. Например, уменьшение содержания окиси углерода, вредных газообразных и токсичных веществ, запыленности можно добиться установкой в местах выделения этих веществ соответствующих фильтров. Не представляет особых трудностей привести в норму освещенность на рабочих местах, а также уменьшить теплоизлучение от установленного оборудования. После проведения соответствующих мероприятий по приведению единичных показателей к значениям, близких к норме, получим новые результаты измерений и расчета, которые сведем в следующую таблицу (классы опасности взяты из нормативов [16н]):

Наименование	$p_i$	$p_i^d$	$p_i^b$	$\Delta p_i$	$\Delta p_n$	$q_i$	Класс опасности
Оксид углерода, мг / м <sup>3</sup>	4 500	5 000	3 000	500	2 000	0,25	1
Вредные газообразные вещества, мг / м <sup>3</sup>	95	100	40	55	60	0,08	2
Токсичные вещества, мг / м <sup>3</sup>	0,35	0,6	0,3	0,05	0,3	0,83	1
Запыленность, мг / м <sup>3</sup>	0,70	1,0	0,4	0,2	0,6	0,5	1
Средняя температура, °С	15	25	18	-3	7	0,57	4
Теплоизлучение, °С	65	70	25	40	45	0,11	3

Окончание табл.

Наименование	$p_i$	$p_i^d$	$p_i^b$	$\Delta p_i$	$\Delta p_n$	$q_i$	Класс опасности
Влажность, %	60	70	55	5	15	0,67	3
Шум, дВ	40	35	25	15	10	-0,5	2
Освещенность, лк	22	25	20	-2	5	-0,6	2
Комплексный показатель безопасности $K_{\Sigma}$						0,46 или 46 %	

Расчет по формуле (21.8) даст следующий результат:  $K_{\Sigma} = 0,46$ , что соответствует 46%, т. е. менее 50%, что свидетельствует о пониженной безопасности ТС. Следовательно, необходимо принять меры к повышению безопасности ТС. Основное влияние на низкое значение безопасности оказывают окись углерода, вредные газообразные и токсичные вещества, запыленность, шум, освещенность. Необходимо эти воздействия уменьшить. Для уменьшения влияния окиси углерода, вредных газообразных и токсичных веществ, запыленности можно применить более качественные фильтры, а также увеличить освещенность. Необходимо путем этих мероприятий добиться увеличения коэффициента безопасности более чем на 50%.

После постановки в рабочей зоне качественного фильтра, увеличения освещенности получили следующие результаты:

Наименование	$p_i$	$p_i^d$	$p_i^b$	$\Delta p_i$	$\Delta p_n$	$q_i$	$k_i$	$K_i$
Окись углерода, мг / м <sup>3</sup>	1 500	5 000	3 000	1 500	2 000	0,25	1	0,25
Вредные газообразные вещества, мг / м <sup>3</sup>	15	100	40	25	60	0,58	2	1,16
Токсичные вещества, мг / м <sup>3</sup>	0,15	0,6	0,3	0,15	0,3	0,5	1	0,5
Запыленность, мг / м <sup>3</sup>	0,1	1,0	0,4	0,3	0,6	0,5	1	0,5
Средняя температура, °С	15	25	18	-3	7	0,57	4	2,28
Теплоизлучение, °С	65	70	25	40	45	0,11	3	0,33
Влажность, %	60	70	55	5	15	0,67	3	2,01
Шум, дВ	40	35	25	15	10	-0,5	2	-1
Освещенность, лк	25	25	20	-5	5	0	2	0
Комплексный показатель безопасности $K_i$						0,67 или 67%		

Таким образом, с помощью применения фильтров и других средств защиты удалось повысить безопасность ТС до 67%. Добиваться абсолютной безопасности, как это было показано выше, нецелесообразно, так как это приведет к большим экономическим затратам.

## **Заключение**

В монографии представлены результаты исследований по прогнозированию надежности технических систем на стадии проектирования. Рассмотрены также вопросы функциональной безопасности технических систем. При этом использовались результаты исследований многих авторов, на работы которых даны ссылки в списке источников, а также материалы стандартов.

Представлена методика определения функциональной безопасности технической системы, основанная на определении слабых элементов и построении их в ряд приоритетности по критериям работоспособности. Далее эти слабые элементы рассматриваются с точки зрения их влияния на безопасность самой технической системы, обслуживающего персонала и окружающей среды. Дан пример такого расчета.

Приведена методика определения экологической безопасности разрабатываемой технической системы на основе методов системного подхода с использованием в качестве предельных нормативных величин вредных веществ, установленных санитарными нормами. Дан пример определения экологической безопасности разработанной технической системы.

Предлагаемая авторами монография впервые рассматривает проблемы прогнозирования надежности и функциональной безопасности технических систем с точки зрения системного подхода и представляет инженерам конкретную методику расчета надежности и функциональной безопасности на стадии проектирования. При анализе надежности технических систем использовались материалы книги В. М. Благодарного «Надежность и диагностика технологических систем» [61].

Монография не лишена недостатков, поэтому авторы с благодарностью примут замечания к сведению.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Решетов, Д. Н. Работоспособность и надежность деталей машин / Д. Н. Решетов. — М. : Высш. шк., 1974. — 206 с.
2. Кубарев, А. И. Надежность в машиностроении / А. И. Кубарев. — М. : Изд-во Стандартов, 1974. — 264 с.
3. Кочергин, А. И. Основы надежности металлорежущих станков / А. И. Кочергин. — Минск : Высш. шк., 1982. — 175 с.
4. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. — М. : МГТУ им. Баумана, 2002. — 560 с.
5. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. — М. : Машиностроение, 1978. — 240 с.
6. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. — М. : Машиностроение. — 1978. — 592 с.
7. Буловский, П. И. Надежность приборов систем управления : справ. пособие / П. И. Буловский, М. Л. Зайденберг. — Л. : Машиностроение, 1975. — 328 с.
8. Зубчанинов, В. В. Научная деятельность и технический прогресс в крупнейших капиталистических странах / В. В. Зубчанинов. — М. : Наука, 1975. — 294 с.
9. Лебедев, О. Т. Прогнозирование подготовки инженерных кадров для электронной промышленности / О. Т. Лебедев. — Л. : ЛГУ, 1977. — 215 с.
10. Воинов, К. Н. Прогнозирование надежности механических систем / К. Н. Воинов. — Л. : Машиностроение, 1978. — 208 с.
11. Садчиков, П. И. Расчет надежности интегральных схем на основе коэффициентных методик и многокомпонентной физико-математической модели / П. И. Садчиков. — М. : Знание, 1978. — С. 3—64.
12. Моисеева, Н. К. Выбор технических решений при создании новых изделий / Н. К. Моисеева. — М. : Машиностроение, 1980. — 181 с.
13. Дедков, В. К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем / В. К. Дедков, Н. Л. Северцев. — М. : Высш. шк., 1976. — 406 с.
14. Рейнике, К. Анализ надежности систем: надежность электронных элементов и систем : пер. с нем. / К. Рейнике ; под ред. Х. Шнайдера. — М. : Мир, 1977. — С. 156—165.
15. Колмогоров, А. Н. Введение в математическую логику / А. Н. Колмогоров, А. Г. Драгалин. — М. : МГУ, 1982. — 120 с.
16. Волков Л. И. Надежность летательных аппаратов / Л. И. Волков, А. М. Шишкевич. — М. : Машиностроение, 1975. — 296 с.
17. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко. — М. : Наука, 1964. — 446 с.

18. Федоров, Д. И. Надежность рабочего оборудования землеройных машин / Д. И. Федоров, Б. А. Бондарович. — М. : Машиностроение, 1981. — 280 с.
19. Надежность систем электроснабжения / В. В. Зорин [и др.]. — Киев — Лейпциг : Віща школа : Нем. изд-во основных видов тяжелой промышленности, 1984. — 132 с.
20. Ушаков, И. А. Задачи расчета надежности / И. А. Ушаков. — М. : Знание, 1981. — 96 с.
21. Соловьев, А. Д. Расчет и оценка характеристик надежности / А. Д. Соловьев. — М. : Знание, 1978. — 50 с.
22. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. — М. : Машиностроение, 1984. — 312 с.
23. Переверзев, Е. С. Применение теории выбросов случайных процессов в параметрических моделях надежности / Е. С. Переверзев, И. А. Куш // Надежность и контроль качества. — 1983. — № 9. — С. 26—31.
24. Лукинский, В. С. Классификация моделей для расчета показателей надежности деталей механических систем / В. С. Лукинский // Машиноведение. — 1985. — № 1. — С. 51—56.
25. Капур, К. Надежность и проектирование систем : пер. с англ. / К. Капур, Л. Ламберсон. — М. : Мир, 1980. — 604 с.
26. Данилин, Н. Г. Обеспечение качества РЭА методами диагностики и прогнозирования / Н. Г. Данилин, Л. И. Гусев, Ю. И. Загоровский. — М. : Изд-во Стандартов, 1983. — 234 с.
27. Bertalanfy, L. General System Theory — A critical review / L. Bertalanfy // General Systems. — 1962. — Vol. 7. — P. 17—23.
28. Цветков, В. Д. Система автоматизации проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков. — М. : Машиностроение, 1972. — 240 с.
29. Клейменов, С. А. Основы проектирования автоматизированных технологических комплексов производства элементов РЭА / С. А. Клейменов, А. И. Павленко, С. Н. Рябов. — М. : Высш. шк., 1984. — 120 с.
30. Имитационное моделирование в оперативном управлении производством / Н. А. Соломатин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1984. — 208 с.
31. Системный анализ и структура управления: в 8 кн. / под общ. ред. В. Г. Шорина. — М. : Знание, 1975. — Кн. 8. — 304 с.
32. Берж, К. Теория графов и ее применение : пер. с франц. / К. Берж. — М. : Изд-во иностр. лит., 1962. — 319 с.
33. Блауберг, И. И. Системный подход: предпосылки, проблемы, трудности / И. И. Блауберг, В. И. Садовский, Э. Г. Юдин. — М. : Философия, 1969. — 47 с.
34. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. — М. : Машиностроение, 1976. — 488 с.
35. Кугель, Р. В. Надежность машин массового производства / Р. В. Кугель. — М. : Машиностроение, 1981. — 244 с.
36. Чумаков, Н. М. Оценка эффективности сложных технических устройств / Н. М. Чумаков, Е. И. Серебряный. — М. : Совет. радио, 1980. — 192 с.
37. Нечипоренко, В. И. Структурный анализ и методы построения надежных систем / В. И. Нечипоренко. — М. : Совет. радио, 1968. — 256 с.
38. Епифанов, А. Д. Надежность автоматических систем / А. Д. Епифанов. — М. : Машиностроение, 1964. — 256 с.

39. *Гмошинский, И. Я.* Инженерное прогнозирование / И. Я. Гмошинский. — М. : Энергоиздат, 1982. — 208 с.
40. Справочник по триботехнике : в 3 т / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичи-надзе. — М. : Машиностроение ; Варшава : ВКЛ, 1989—1992. — 478 с.
41. *Ионак, В. Ф.* Приборы кинематического контроля / В. Ф. Ионак. — М. : Машиностроение, 1981. — 129 с.
42. *Литвак, Б. Г.* Экспертная информация : Методы получения и анализа / Б. Г. Литвак. — М. : Радио и связь, 1982. — 184 с.
43. *Благодарный, В. М.* Контрольно-испытательная станция для обкатки мелкомодульных зубчатых приводов: информ. л. № 181 / В. М. Благодарный, А. М. Даньков, В. М. Пономарев. — Минск : [б. и.], 1977. — 6 с.
44. *Благодарный, В. М.* Расчет мелкомодульных зубчатых передач на износ и прочность / В. М. Благодарный. — М. : Машиностроение, 1985. — 128 с.
45. *Благодарный, В. М.* Ускоренные испытания приборных зубчатых приводов / В. М. Благодарный. — М. : Машиностроение, 1980. — 112 с.
46. Надежность технических систем и техногенный риск: электронное учебное пособие для специалистов РСЧС и студентов МЧС / [http://www.obzh.ru/obzh\\_76.htm/](http://www.obzh.ru/obzh_76.htm/).
47. *Белов, В.П.* О понятиях «надежность» и «безотказность» технических систем с позиций разработчиков / В. П. Белов, А. Д. Голиков, С. Я. Старков // Методы менеджмента качества, № 10, 2003. — С. 46—49.
48. *Мошкин, Н.В.* Безопасность жизнедеятельности : учеб. пособие / Н. В. Мошкин.
49. *Василко, К.* История техники и технологии / К. Василко ; пер. со словацкого проф. В. М. Благодарного. — Барановичи: РИО БарГУ, 2008. — 328 с.
50. *Ветошкин, А. Г.* Надежность и безопасность технических систем : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин, В. И. Марунин. — Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. — 123 с.
51. *Ветошкин, А. Г.* Технический риск и безопасность : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин, К. Р.Таранцева. — Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. — 121 с.
52. *Матвиенко, Ю. Г.* Анализ риска и проблемы безопасности : в 4 ч. Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности. Научн. руковод. К. В. Фролов / М.: МГФ «Знание», 2006. 640 с.
53. *Аронов, И. З.* Методология оперативного управления безопасностью технических систем на основе процедур статистического анализа нарушений при эксплуатации и стандартизация методов оценки: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 08.00.20 / И. З. Аронов ; Научно-техн. центр по ядерной и радиац. Безопасности Гостехнадзора России. — М. : [б. и.], 1998. — 50 с.
54. *Арнольд, В. И.* Теория катастроф / В. И. Арнольд. — 4-е изд., стер. — М. : Едиториал, 2004. — 127 с.
55. *Михайлов, А. В.* Физическая теория катастроф / А. В. Михайлов. — СПб. : Реноме, 2009. — 130 с.
56. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / В. А. Акимов [и др.] ; под общ. ред. М. И. Фалеева. — М. : ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. — 368 с.
57. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем : учебник / Л. Н. Александровская [и др.] ; под ред. В. П. Соколова. — М. : Логос, 2001. — 232 с.
58. *Попов, Ю. В.* Теория катастроф и безопасность полетов / Ю. В. Попов // Проблемы безопасности полетов. — 2008. — № 8. — С. 30—38.

59. Алпеев, А. С. Основные понятия безопасности / А. С. Алпеев // Надежность и контроль качества. — 1994. — № 7. — С. 29—40.

60. Blagodarnyj, V. Spôľahlivosť a diagnostika technologických systémov / V-Blagodarnyj, O.Barborák, P-Lipták // „TRANSFER 2009“: Využívanie nových poznatkov v strojárskjej praxi, 11 medzinárodná vedecká konferencia, 17—18. 09. 2009, Trenčín. — S. 25—32.

61. Благодарный, В. М. Надежность и диагностика технологических систем : курс лекций / В. М. Благодарный. — Барановичи : РИО БарГУ, 2009. — 192 с.

## ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ

1. Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты : ГОСТ Р 51898-2002. — М. : Издательство стандартов, 2002. — 15с.

2. Безопасность машин. Основные положения, общие принципы конструирования. Термины, технологические решения и технические условия. — М. : Издательство стандартов, 2000. — 15с.

3. Безопасность машин. Основные понятия, общие принципы конструирования : ГОСТ Р 51333-99.

4. Безопасность машин. Принципы оценки и определения риска : ГОСТ Р 51344-99. — М. : Издательство стандартов, 2000. — 15 с.

5. ГОСТ 2.102-68 ЕСКД Виды и комплектность конструкторских документов.

6. Естественное и искусственное освещение. Нормы : СНИП 11 4-79.

7. Металлы. Методы испытаний на усталость : ГОСТ 2860-65.

8. Надежность в технике. Анализ последствий и критичность отказов. Основные положения : ГОСТ 27.310-95. — М. : Издательство стандартов, 2000. — 15 с.

9. Надежность в технике. Прогнозирование надежности изделий при проектировании. Общие требования : ГОСТ 27.301-83.

10. Надежность в технике. Термины и определения : ГОСТ 27.002-89.

11. Надежность изделий машиностроения. Ускоренная оценка пределов выносливости методом ступенчатого нагружения (Локати) : ГОСТ 19.533-74.

12. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны : ГОСТ 12.1. 005-88. ССПТ.

13. Передачи зубчатые мелкокомодульные. Показатели точности : ГОСТ 9.178-81.

14. Система стандартов безопасности труда. Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности : ГОСТ 12.2.002-91. — М. : Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. — 60 с.

15. Содержание вредных веществ : ГОСТ 12.2. 002-91. ССПТ.

16. Термины, технологические решения и технические условия. — М. : Издательство стандартов, 2000. — 55 с.

17. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции : ГОСТ 23.554.1-79. —

17. Гигиенические нормативы 21.6.12-46-2005. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Минск, 2005. — 188 с.

*Научное издание*

**Благодарный Владимир Маркович  
Кочурко Василий Иванович**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ  
И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Монография**

Технический редактор *М. Л. Потапчик*

Корректор *А. М. Войнова*

Компьютерная верстка *В. В. Кукреш*

Ответственный за выпуск *Е. Г. Хохол*

Подписано в печать 17.11.2010.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.

Гарнитура Таймс. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 15,11 . Уч.-изд. л. 12,16.

Заказ 166. Тираж 110 экз.

ЛИ 02330/0552803 от 09.02.2010

Издатель и полиграфическое исполнение:

учреждения образования

«Барановичский государственный университет»,

225404, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.

Репозиторий Баргу

Репозиторий Баргу