

1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Задачи оценки надежности

Теория надежности – наука, изучающая закономерности отказов технических систем.

Основными объектами ее изучения являются:

- свойства, критерии и показатели надежности технических систем;
- методы анализа надежности в процессе проектирования и эксплуатации технических систем;
- методы синтеза надежности технических систем;
- методы обеспечения и повышения надежности технических систем;
- научные методы эксплуатации техники, обеспечивающие повышения надежности.

Для автоматизированных систем (АС), являющихся сложными человеко-машинными системами, важнейшее значение имеет надежность функционирования. Сложность АС приводит к тому, что пути и способы обеспечения их надежности не очевидны и, в каждом отдельном случае, обусловлены особенностями разрабатываемых систем. Выработка обоснованных рекомендаций, связанных с обеспечением требуемой (заданной) надежности современных АС с наименьшими затратами, требует выполнения серьезных научно-инженерных исследований и расчетов.

Задача оценки надежности АС может быть поставлена как определение свойств и показателей надежности системы в целом по показателям надежности входящих в её состав элементов. Предполагается, что АС состоит из подсистем, в состав которых входит некоторое число *первичных элементов*. По количеству этих элементов, числу и характеру связей между ними, числу возможных перестроений структуры в процессе эксплуатации система может быть различной степени сложности. Тогда определить надежность системы в целом можно по *структурной схеме надежности* или *модели надежности*, учитывающей структуру системы, число первичных элементов и характер их связей, а также степень влияния параметров надежности первичных элементов на общую надежность. Все свойства первичных элементов, имеющие отношения к надежности системы, учитываются *множеством параметров* $A = \{a_i\}, i = 1, 2, \dots, N$, где N – число параметров надежности первичных элементов, рассматриваемых при решении задачи.

Очевидно, что многие сложные системы могут принципиально выполнять свои функции при условии, что некоторая часть их элементов находится в нерабочем состоянии. Например, при наличии в АС нескольких принтеров, выход из строя одного из них может только снизить качество ее функционирования (увеличить время печати выходных документов).

Таким образом, решающим в оценке надежности сложных АС является правильный учет последствий с точки зрения *эффективности функционирования системы*, к которым приводят отказы тех или других ее элементов.

Эффективность – это мера проявления качества системы или некоторой совокупности отдельных её свойств в различных режимах эксплуатации. Степень реализации при проектировании и изготовлении и проявления в процессе эксплуатации конкретного свойства измеряется *показателем*.

Ясно, что показатель эффективности системы, как меры проявления совокупности ее свойств (качества), зависит от значений параметров A . Поэтому любые изменения характеристик надежности первичных элементов или взаимодействий между ними сказываются, в той или иной мере, на значениях параметров A и, в конечном итоге, на величине показателя эффективности F всей системы.

Надежность первичных элементов можно описывать различными вероятностными характеристиками, например, вероятностью безотказной работы в зависимости от времени, параметрами потока отказов и др.

Очевидно, что отказы первичных элементов снижают эффективность на некоторое ΔF . Степень снижения эффективности АС за счет отказов элементов достаточно хорошо описывает последствия, к которым приводят отказы. Из этих соображений и может быть выбран показатель надежности системы. Предположим, что имеется возможность вычислять F с учетом параметров A . Тогда может быть вычислено значение показателя эффективности F_n^0 в предположении, что все первичные элементы системы абсолютно надежны. Затем вычисляется значение показателя эффективности F_n^* при условии, что отказы элементов могут происходить с интенсивностями, соответствующими заданным характеристикам. Тогда значение

$$\Delta F_n = F_n^0 - F_n^*$$

можно принять в качестве показателя надежности сложной системы.

Величина ΔF_n показывает, насколько снижается эффективность системы за счет возможных отказов ее элементов по сравнению с эффективностью идеальной системы. Очевидно, что показатель ΔF_n , а особенно отношение $\Delta F_n/F_n$, могут быть использованы для *сравнительной оценки надежности различных вариантов АС*. Если отношение $\Delta F_n/F_n$ мало, то отказы элементов слабо влияют на эффективность системы и, следовательно, тратить средства на повышение надежности элементов нецелесообразно.

Если отношение $\Delta F_n/F_n$ *значительно, то необходимо повышать надежность с применением следующих методов:*

- 1) увеличения надежности элементов;
- 2) резервирования мало надежных элементов, т.е. введение избыточности (использования методов структурной надежности);
- 3) применения профилактических мероприятий и т.д.

Отсюда следует ещё одна задача, связанная с оценкой, прогнозированием и обеспечением надежности АС, для решения которой необходимо учитывать возможность восстановления отказавших элементов за счет диагностики неисправностей, профилактических мероприятий и ремонтных работ по их устранению. Возможности выявления причин сбоев, длительности обнаружения и восстановления отказавших элементов задаются соответствующими вероятностными характеристиками.

1.2. Основные понятия и определения

Под *автоматизированной системой управления (АСУ)* понимается комплекс технических средств (компьютеров, промышленных контроллеров, устройств числового программного управления станками и промышленными роботами, устройств управления транспортными средствами и другими технологическими установками), объединенных локальными вычислительными сетями и обеспечивающих сбор, обработку, хранение и передачу управляющей информации.

Надежность – сложное свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнить требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность является одним из важнейших сложных свойств системы, совокупность которых образует его качество.

Существуют *единичные и комплексные показатели* надежности, характеризующие единичные и комплексные свойства, в совокупности образующие сложное свойство надежности АС.

В отличие от таких свойств системы как быстродействие, производительность, емкость памяти, потребляемая мощность, масса и др., которые оцениваются для некоторого момента времени, надежность характеризует зависимость «точечных» значений показателей либо от времени использования системы, либо от наработки.

Надежность – свойство системы, зависящее от времени. Оценка надежности может быть ориентирована либо на прошедшее время (в этом случае говорят, что система до данного момента проработала такое-то количество часов, поэтому она характеризуется таким-то значением показателя надежности), либо на будущее время (в этом случае говорят, что данная система, если она будет использоваться в данных условиях, будет обладать такой-то надежностью).

Единичными свойствами надежности системы принято считать:

1. *Безотказность* – свойство системы непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени, или некоторой наработки.

2. *Ремонтопригодность* – свойство системы, заключающееся в приспособленности его к предупреждению и обнаружению отказов и восстановлению работоспособности объекта либо путем проведения ремонта, либо путем замены отказавших элементов.

3. *Долговечность* – свойство системы сохранять эксплуатационные характеристики до наступления предельного состояния (капитальный ремонт или снятие с эксплуатации).

4. *Сохраняемость* – свойство системы сохранять эксплуатационные характеристики в течение срока его хранения и транспортирования, установленного технической документацией.

Перечисленные единичные свойства являются приемлемыми практически для всех технических систем.

Однако для АСУ, как и для ряда других классов кибернетических систем, перечисленных свойств для характеристики надежности оказывается недостаточно. В практике создания и эксплуатации таких систем находят применение дополнительные два единичных свойства надежности:

1. *Живучесть* – свойство системы сохранять работоспособность (полностью или частично) в условиях неблагоприятных воздействий, не предусмотренных нормальными условиями эксплуатации.

2. *Достоверность информации*, выдаваемой системой. Это относится к сбоям и ошибкам, искажающим информацию.

При введении в техническую документацию тех или других показателей надежности необходимо исключать лишние, ненужные для описания комплексного показателя надежности, а также те, которые нельзя измерить или которые не имеют определенного ясного и понятного физического смысла.

Для описания и оценки надежности необходимо выделить следующие *виды надежности*:

1. *Аппаратная надежность* – надежность комплекса технических средств (КТС).

2. *Программная надежность* – надежность программного обеспечения (ПО) системы.

3. *Функциональная надежность* – надежность выполнения отдельных функций, возлагаемых на систему, персоналом системы во взаимодействии с КТС и ПО.

4. *Структурная надежность персонала системы* – свойство персонала непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени в заданных условиях.

Аппаратная надежность КТС и структурная надежность персонала являются *базовыми свойствами*, без проявления которых принципиально невозможно функционирование системы.

Функциональная и программная надежности проявляются в процессе работы АС по обработке данных и выработке рекомендаций по управлению. Эти виды надежности относятся к *прагматическим* свойствам, проявляющимся в процессе эксплуатации системы по прямому назначению.

АС является многофункциональной системой, причем требования к надежности выполнения различных функций могут быть различными.

Например, для функции «расчет зарплаты» требуется высокая безошибочность и определенная точность, но не требуется жесткого ограничения времени выполнения (быстродействия), а АС, работающая в рамках реализации быстропротекающего технологического процесса, требует безошибочности, точности и быстродействия, так как в этом случае система выполняет оперативные функции обработки информации и управления.

Отдельного внимания заслуживает программная надежность (надежность ПО), что объясняется широким внедрением программно-управляемых объектов (программно-управляемые станки, вычислительные машины и системы ЭВМ, системы передачи данных и др.). Для этих объектов характерно органическое слияние КТС и программ, совместно реализующих операции обработки данных и управления. Без надежного ПО, даже при высокой надежности КТС и персонала, говорить о надежности системы беспредметно.

Перечисленные стороны и виды надежности не всегда рассматриваются все при задании требований по надежности к системе и ее частям. В каждом конкретном случае следует пользоваться теми из них, которые необходимы для характеристики надежности системы с учетом ее целевого назначения.

1.3. Факторы, влияющие на надежность, и обеспечение надежности

Фактор – обстоятельство или совокупность обстоятельств, каким-либо образом влияющие на единичные и/или комплексные свойства АС. Изучением влияния значимых факторов на надежность объектов занимается специальный раздел, называемый анализом физики отказов. Эти работы лежат в основе проектирования, испытаний и эксплуатации АС.

В процессе проектирования при оценке надежности свойств, закладываемых в проект системы, необходимо учитывать влияние поля значимых факторов на значения показателей надежности.

При организации испытаний на надежность должны быть воспроизведены все основные факторы, влияющие на надежность системы.

При эксплуатации должны предусматриваться меры по снижению влияния неблагоприятных факторов и созданию комфортных условий для работы персонала, комплекса технических средств и программного обеспечения.

АС подвергаются воздействию эргономических, технических, эксплуатационных и программных факторов соответственно.

1. Эргономические факторы.

Эргономические факторы - факторы, влияющие на взаимодействие персонала с техническими и программными средствами АС и на условия трудовой деятельности персонала.

К эргономическим факторам относятся:

- 1) организация АС как системы “человек - машина - среда”;
- 2) организация деятельности персонала системы на каждом АРМ;
- 3) технические средства деятельности персонала;
- 4) форма, объем и конструкция функциональных помещений;
- 5) физические, химические, биологические и социально-бытовые характеристики внешней среды;
- 6) эстетические характеристики внешнего строения рабочих мест и функциональных помещений.

2. Технические факторы.

Технические факторы влияют на состояние технических средств.

К техническим факторам относятся:

- 1) структура системы и номенклатура ее рабочих режимов;
- 2) способы резервирования элементов, блоков, устройств;
- 3) способы контроля и восстановления работоспособности КТС;
- 4) характеристики комплектующих элементов;
- 5) способы защиты от неблагоприятных воздействий (герметизация, экранизация, помехозащищенность, теплозащищенность и т. п.);
- 6) качество технологического процесса обработки данных и выработки управленческих решений (качество информационной технологии).

3. Программные факторы.

Программные факторы – факторы, влияющие на состояние средств программного обеспечения (в т. ч. специального и системного ПО) АС.

К программным факторам относятся:

- 1) точность математической формализации задач обработки данных и управления;
- 2) полнота и обоснованность требований к программному обеспечению;
- 3) степень удовлетворения требований при разработке ПО;
- 4) степень отлаженности программ;
- 5) качество структуры общего алгоритма обработки данных и степень согласованности отдельных программ в каждом программном модуле.

4. Эксплуатационные факторы.

Кроме перечисленных факторов существуют факторы, которые следует учитывать непосредственно в процессе эксплуатации.

К эксплуатационным факторам относятся:

- 1) условия, в которых система функционирует по назначению;
- 2) условия проведения обслуживания (профилактики);
- 3) своевременность и полнота ремонта (восстановления) элементов и частей системы;
- 4) обеспеченность запасными элементами и принадлежностями;
- 5) соблюдение режимов труда и отдыха персонала;
- 6) поддержание параметров внешней среды и условий обитаемости на рабочих местах и в функциональных помещениях.

Программа обеспечения надежности.

При исследовании надежности сложных систем возникает задача выявления причин, приводящих к проявлению той или иной стороны надежности. Без знания этих причин нельзя составить и реализовать *программу обеспечения надежности (ПОН)* системы на этапах ее разработки и эксплуатации.

Такая программа входит в состав нормативно-технической документации и несет некоторые *рекомендации по обеспечению надежности*.

Основные рекомендации по обеспечению технической надежности сложной системы состоят в следующем:

1. Применять рациональную структуру системы, в том числе целесообразные резервирование и встроенный контроль, а также отлаженное программное обеспечение.
2. Использовать комплектующие элементы, материалы и другие технические устройства, обеспечивающие требования к надежности.
3. Герметизировать, термостатировать и обеспечивать виброустойчивость аппаратуры.
4. Защищать от электромагнитных помех.
5. Предохранять детали и узлы от коррозии (покрытия, пропитки).
6. Создавать элементную базу с малой чувствительностью к температурному влиянию и помехам.
7. Применять материалы с повышенной прочностью, износоустойчивостью и антикоррозионной стойкостью.
8. Защищать технические элементы от механических перегрузок.

Рекомендации по обеспечению эксплуатационной надежности систем:

1. Создавать комплексную защиту рабочих мест и функциональных помещений, а также снабжать персонал средствами индивидуальной защиты.
2. Разрабатывать полные и удобные для пользователей инструкции по эксплуатации КТС и ПО, особо обращая внимание на аварийные ситуации.
3. Создавать требуемые условия для обслуживания и ремонта КТС, контроля и восстановления программного обеспечения.
4. Внедрять рациональную автоматизацию в процессы эксплуатации, обслуживания и ремонта.
5. Повышать (поддерживать) квалификацию персонала системы путем непрерывного обучения и тренировок.

1.4. Нормативная база надежности АС

Главными нормативными документами, устанавливающими номенклатуру терминов и их определения, в области надежности техники являются государственные стандарты.

1. ГОСТ Р 27.001-2009 Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения.
2. ГОСТ Р 27.002-2009 Надежность в технике. Термины и определения.
3. ГОСТ Р 27.003-2011 Надежность в технике. Управление надежностью. Руководство по заданию технических требований к надежности.
4. ГОСТ Р 27.004-2009 Надежность в технике. Модели отказов.
5. ГОСТ 23146-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Выбор и задание показателей ремонтпригодности.
6. ГОСТ 17572-72. Надежность в технике. Испытания с ограниченным числом отказов.
7. ГОСТ 27.504-84. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по цензурированным выборкам.
8. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

1.5. Понятие отказа. Классификация отказов

В основе понятия надежности любого объекта лежит понятие *отказа*.

Отказ объекта – событие, заключающееся в том, что объект либо полностью, либо частично теряет свойство работоспособности.

Отказ может быть связан с нарушением в выполнении каких-либо заданных функций (отказ функционирования) или с недостаточной квалификацией обслуживающего персонала, в результате которой система не выполняет заданные функции удовлетворительно. Отказы могут быть связаны с изменением параметров или характеристик системы, т.е. одна из основных функций выполняется плохо (отказ по параметру).

Классифицировать отказы можно в зависимости от характера и особенностей, от момента возникновения, например следующим образом.

1. По характеру изменения параметра до момента возникновения отказа:
 - внезапный отказ;
 - постепенный отказ.
2. По связи с другими отказами:
 - независимый отказ;
 - зависимый отказ.
3. По возможности последующего использования после возникновения отказа:
 - полный отказ;
 - частичный отказ.
4. По характеру устранения отказа:
 - устойчивый отказ;
 - самоустраняющийся отказ (сбой или перемежающийся отказ).
5. По наличию внешних проявлений:
 - очевидный (явный) отказ;
 - скрытый (неявный) отказ.
6. По причине возникновения:
 - конструкционный отказ;
 - технологический отказ;
 - эксплуатационный отказ.
7. По природе происхождения:
 - естественный отказ;
 - искусственный отказ (вызываемый намеренно).
8. По времени возникновения отказов:
 - отказ при испытаниях;
 - отказ периода приработки;
 - отказ периода нормальной эксплуатации;
 - отказ последнего периода эксплуатации.

При полной потере работоспособности возникает *полный отказ*, а при неполной – *частичный отказ*. Понятия полного и частичного отказа каждый раз при решении задач оценки и обеспечения надежности систем должны быть четко определены, так как формулировка требований к надежности системы и ее частей и количественная оценка степени их реализации без указания признаков отказа не имеет смысла.

Отказы подразделяются в зависимости от природы их возникновения на *внезапные* и *постепенные*. Разделять внезапные и постепенные отказы необходимо, так как закономерности, которым они подчиняются, и способы борьбы с ними различны.

Внезапный отказ возникает вне зависимости от предшествующих постепенных изменений свойств объекта, а постепенный – в результате длительного накопления повреждений, например, для технических средств – вследствие износа и старения материалов, для персонала – вследствие утомления. Для уменьшения числа внезапных отказов КТС целесообразна предварительная тренировка и приработка элементов с целью выявления скрытых дефектов производства, а также введение защиты от неблагоприятных воздействий

помех, перегрузок, вибраций и др. Для уменьшения числа постепенных отказов КТС следует организовать своевременную замену элементов, выработавших технический ресурс, а для уменьшения постепенных отказов персонала – организация правильного режима труда и отдыха, сменности.

Отказ может быть кратковременным самоустраняющимся – *сбоем*. Характерным признаком сбоя является восстановление работоспособности без ремонтных (для техники) или восстановительных (для персонала и программного обеспечения) мероприятий. Причиной сбоя технических средств может быть их кратковременный отказ, либо кратковременно действующая помеха, для ПО – сбой в реализации программы, для оператора – ошибка, приводящая к нарушению в выполнении предписанного алгоритма деятельности. В общем случае возникновение сбоев приводит к снижению быстродействия системы, а в определенных условиях, когда факт сбоя своевременно не обнаруживается в процессе функционирования, он может привести к таким искажениям в обработке информации, которые затем вызовут отказ при выполнении системой заданной функции.

Все *устойчивые отказы* в АС целесообразно подразделить на следующие три класса:

1. *Аппаратные* – события, при которых какие-либо технические средства системы утрачивают работоспособность и для их восстановления требуется проведение ремонтных работ или замена отказавших элементов, блоков, приборов, устройств и др.

2. *Программные* – события, при которых программное обеспечение системы утрачивает работоспособность по причине несовершенства программ (несовершенство алгоритма, ошибки в кодировке, не выявленные в процессе отладки и тестирования, и т.д.).

3. *Эргономические* – события, при которых персонал системы утрачивает работоспособность по причине гибели, ранениях людей или их ошибочных действий при взаимодействии со средствами вычислительной техники или программным обеспечением.

1.6. Причины потери работоспособности технического объекта

Те изменения, которые происходят с течением времени в любой технической системе и приводят к потере ее работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями, которым она подвергается. В процессе эксплуатации на систему действуют все виды энергии, что может привести к изменению параметров отдельных элементов, механизмов и системы в целом.

При этом имеется три основных источника воздействий:

- действие энергии окружающей среды, включая человека, исполняющего функции оператора или ремонтника;

- внутренние источники энергии, связанные как с рабочими процессами, протекающими в технической системе, так и с работой отдельных элементов системы;

- потенциальная энергия, которая накоплена в материалах и деталях узлов системы в процессе их изготовления (внутренние напряжения в отливке, монтажные напряжения).

При работе технического объекта наблюдаются следующие основные виды энергии, влияющие на его работоспособность.

Механическая энергия, которая не только передается по всем элементам системы в процессе работы, но и воздействует на нее в виде статических или динамических нагрузок от взаимодействия с внешней средой.

Силы, возникающие в узлах технической системы, определяются характером рабочего процесса, инерцией перемещающихся частей, трением в кинематических парах. Эти силы являются случайными функциями времени. Природа их возникновения, как правило, связана со сложными физическими явлениями.

Механическая энергия в системе может возникнуть и как следствие тех затрат энергии, которые имели место при изготовлении отдельных частей системы и сохранились в них в потенциальной форме. Например, деформация частей при перераспределении внутренних напряжений, изменение объема детали после ее термической обработки происходят без всяких внешних воздействий.

Тепловая энергия действует на систему и ее части при колебаниях температуры окружающей среды, при осуществлении рабочего процесса (особенно сильные тепловые воздействия имеют место при работе двигателей и ряда технологических машин), при работе приводных механизмов, электротехнических и гидравлических устройств.

Химическая энергия также оказывает влияние на работу системы. Даже воздух, который содержит влагу и агрессивные составляющие, может вызвать коррозию отдельных узлов системы.

Если же оборудование системы работает в условиях агрессивных сред (оборудование химической промышленности, суда, многие машины текстильной промышленности и др.), то химические воздействия вызывают процессы, приводящие к разрушению отдельных элементов и узлов системы.

Электромагнитная энергия в виде радиоволн (электромагнитных колебаний) пронизывает все пространство вокруг объекта и может оказать влияние на работу электронной аппаратуры.

Биологические факторы также могут влиять на работоспособность системы. Например, в тропических странах имеются микроорганизмы, которые не только разрушают некоторые виды пластмасс, но даже могут воздействовать на металл.

Таким образом, все виды энергии действуют на техническую систему и ее механизмы, вызывают в ней целый ряд нежелательных процессов, создают условия для ухудшения её технических характеристик.

Сочетание механических воздействий в том числе высокочастотных колебаний, а также влияние температурных и химических факторов на элементы конструкции самолетов приводит к тому, что в них могут возникнуть усталостные разрушения (трещины). Они снижают несущую способность сис-

темы, что при определенной величине повреждения приводит к разрушению элемента конструкции и может закончиться аварией.

Процесс, возникающий в результате действия того или иного вида энергии, может не сразу привести к повреждению изделия. Часто существует период «накопления воздействий» прежде чем начнется период внешнего проявления процесса, т. е. повреждение изделия. Например, для начала развития усталостной трещины необходимо определенное число циклов переменных напряжений.

Повреждение материала изделия — это отклонение его контролируемых свойств от начальных, оно связано с выходными параметрами изделия определенной зависимостью. Не всякое повреждение влияет на выходные параметры изделия. Также и определенная степень этого повреждения может не повлиять на показатели работоспособности.

В надежности машин часто пользуются понятием *дефекта*, т. е. такого состояния изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации, однако остается работоспособным. При этом дефект рассматривается как возможная причина отказа.

Понятие дефекта следует относить только к результату технологического процесса, а понятие повреждения - к результату воздействий на систему при ее эксплуатации. При этом необходимо рассматривать не только факт возникновения повреждений, но и оценить степень этого повреждения. При достижении некоторого максимального значения степени повреждения наступает отказ изделия.

1.7. Физические причины появления отказов

Изменение начальных свойств и состояния материалов, из которых выполнено изделие, является первопричиной потери им работоспособности, так как эти изменения могут привести к повреждению изделия и к опасности возникновения отказа.

Чем глубже изучены закономерности, описывающие процессы изменения свойств и состояния материалов, тем достовернее можно предсказать поведение изделия в данных условиях эксплуатации и обеспечить сохранение показателей надежности в требуемых пределах.

Хотя для оценки надежности, как правило, используются вероятностные характеристики, это не значит, что суждение о поведении изделия можно сделать лишь на основании статистических исследований.

Наоборот, в основе потери машиной работоспособности всегда лежат физические закономерности, но в силу разнообразия и переменности действующих факторов эти зависимости приобретают вероятностный характер.

Условия эксплуатации (нагрузки, скорости, температура и др.), состояние материала (твердость, прочность, качество поверхности и т. д.) и другие факторы, влияют на протекание процесса повреждения материала. Однако при наличии только функциональной зависимости, достаточно достоверно описывающей данное явление, нельзя еще точно предсказать, как будет про-

текать данный процесс, так как сами эти факторы являются случайными величинами.

Действительно, при работе машины происходят непредвиденные изменения и колебания нагрузок, скоростей, температур, степени загрязнения поверхностей. Более того, сами детали машины могут быть выполнены с различными допусками на технологические параметры (точность, однородность материала и др.).

Однако знание физической закономерности процесса в корне изменяет возможности по оценке хода процесса по сравнению со случаем, когда этот процесс оценивается только на основе статистических наблюдений.

Функциональная зависимость, хотя и абстрагирует действительность и лишь с известной степенью приближения отражает физическую сущность процесса, но позволяет предсказывать возможный ход процесса при различных ситуациях.

Поэтому «физика отказов», которая изучает закономерности изменения свойств материалов в условиях их эксплуатации, является основой для изучения и оценки надежности технических систем. Для решения инженерных задач надежности необходимо знать закономерности изменения выходных параметров системы и её элементов во времени.

1.8. Законы состояния материалов

Как физические законы, так и полученные на их основе частные зависимости, описывающие изменение свойств и состояния материалов, можно разделить на две основные группы.

Во-первых, это закономерности, описывающие взаимосвязи обратимых процессов, когда после прекращения действия внешних факторов материал (и соответственно деталь) возвращается в исходное состояние. Эти зависимости называются *законами состояния*.

Во-вторых, имеются закономерности, которые описывают необратимые процессы и, следовательно, позволяют оценить те изменения начальных свойств материалов, которые происходят или могут происходить в процессе эксплуатации изделия. Эти зависимости называются *законами старения*.

Законы состояния можно разделить на статические, когда в функциональную зависимость, описывающую связь между входными и выходными параметрами, фактор времени не входит, и на переходные процессы, где учитывается изменение выходных параметров во времени.

Типичными примерами статических законов состояния могут служить закон Гука, закон теплового расширения твердых тел и др. На основании этих законов получены расчетные зависимости для решения различных инженерных задач.

Статические законы, описывающие изменения состояния изделия, хотя и не включают фактор времени, но могут быть использованы для расчетов надежности, если известны изменения характеристик изделия в процессе эксплуатации.

Законы состояния, описывающие переходные процессы, например колебания упругих систем, процессы теплопередачи и другие, хотя и включают фактор времени, но также не учитывают изменений, происходящих при эксплуатации изделий. Обычно они относятся к категории быстропротекающих процессов или процессов средней скорости. Лишь при известном изменении уровня внешних воздействий их можно использовать для решения задач надежности.

Законы старения, оценивающие степень повреждения материала в функции времени, являются основой для решения задач надежности. Они позволяют прогнозировать ход процесса старения, оценивать возможные его реализации и выявлять наиболее существенные факторы, влияющие на интенсивность процесса. Типичным примером таких зависимостей являются законы износа материалов, которые на основе раскрытия физической картины взаимодействия поверхностей дают методы для расчета интенсивности процесса изнашивания или величины износа в функции времени и оценивают параметры, влияющие на ход процесса.

Любой процесс старения возникает и развивается лишь при определенных внешних условиях. Для оценки возможных видов повреждения материалов деталей машин необходимо установить область существования процесса старения и в первую очередь условия его возникновения. Для возникновения процесса обычно должен быть превзойден определенный уровень нагрузок, скоростей, температур или других параметров, определяющих его протекание. Этот начальный уровень или порог чувствительности особенно важно знать для быстропротекающих процессов старения, когда после возникновения процесса идет его интенсивное лавинообразное развитие. Часто порог чувствительности связывают с некоторым энергетическим уровнем, который определяет начало данного процесса. Например, энергия активации определяет энергетический уровень, начиная с которого может идти процесс изменения свойств материала.

1.9. Отказы, вызываемые общими причинами

Множественный отказ есть событие, при котором несколько элементов выходят из строя по одной и той же причине. К числу таких причин могут быть отнесены следующие:

- конструкторские недоработки оборудования (дефекты, не выявленные на стадии проектирования и приводящие к отказам вследствие взаимной зависимости между электрическими и механическими подсистемами или элементами избыточной системы);
- ошибки эксплуатации и технического обслуживания (неправильная регулировка или калибровка, небрежность оператора, неправильное обращение и т. я.);
- воздействие окружающей среды (пыль, грязь, температура, вибрация, а также экстремальные режимы нормальной эксплуатации);

- внешнее катастрофическое воздействие (естественные внешние явления, такие, как наводнение, землетрясение, пожар, ураган);
- общий изготовитель (резервируемое оборудование или его компоненты, поставляемые одним и тем же изготовителем, могут иметь общие конструктивные или производственные дефекты. Например, производственные дефекты могут быть вызваны неправильным выбором материала, ошибками в схемах монтажа, некачественной пайкой и т. п.);
- общий внешний источник питания (общий источник питания для основного и резервного оборудования, резервируемых подсистем или элементов);
- неправильное функционирование (неверно выбранный комплекс измерительных приборов или неудовлетворительно спланированные меры защиты).

1.10. Показатели надежности

Современные технические системы включают в себя большое количество элементов. В зависимости от сложности элементов и приспособленности к восстановлению эти элементы относятся к *восстанавливаемым* и *невосстанавливаемым*.

Невосстанавливаемым называют такой элемент, который после работы до первого отказа заменяют на такой же элемент, так как его восстановление в условиях эксплуатации невозможно. В качестве примеров невосстанавливаемых элементов можно назвать диоды, конденсаторы, триоды, микросхемы, гидроклапаны, пиропатроны и т.п.

Восстанавливаемость является очень важным свойством элемента системы и, как правило, восстанавливаемые элементы имеют более высокие показатели надежности по сравнению с невосстанавливаемыми элементами. В случае, когда восстанавливаемые элементы имеют более низкие показатели надежности, надежность всей системы можно обеспечить за счет своевременного предупреждения, обнаружения и устранения отказа, что возможно при организации эффективной системы технического обслуживания и ремонта оборудования.

Показатель надежности – количественная характеристика единичного или комплексного свойства надежности. Поэтому на практике используются единичные и комплексные показатели надежности АС или её частей.

Числовые значения количественных показателей надежности зависят от того, как часто возникают отказы и насколько быстро они устраняются. Ввиду того, что отказы, как правило, являются случайными событиями, то поэтому показатели надежности характеризуют случайные величины и случайные события. Основные единичные показатели приведены в таблице 1. Комплексные показатели приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Единичные показатели надежности

Свойство надежности	Показатель	Обозначения
Безотказность	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
	Вероятность отказа	$Q(t)$
	Плотность распределения времени безотказной работы (частота отказов)	$f(t)$
	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$
	Плотность вероятности возникновения отказа (параметр потока отказов)	$\omega(t)$
	Среднее время безотказной работы (средняя наработка до отказа) (наработка на отказ)	$T_{cp} (T_o)$
Долговечность	Назначенный предельный ресурс	T_n
	Эксплуатационный ресурс	$T_э$
	Срок службы	T_c
Ремонтопригодность	Вероятность восстановления	$P_B(t)$
	Среднее время восстановления	T_B
	Средняя продолжительность внепланового ремонта	$T_{ВП}$
	Средняя продолжительность планового ремонта	$T_{ПР}$
Сохраняемость	Назначенный срок хранения	T_{xp}

Таблица 2 – Комплексные показатели надежности

Показатель	Обозначения
Коэффициент готовности	K_G
Коэффициент оперативной готовности	K_{OG}
Коэффициент технического использования	$K_{ТИ}$

Основные единичные показатели надежности невосстанавливаемых систем

Для невосстанавливаемых систем чаще всего используются четыре показателя надежности: вероятность безотказной работы $P(t)$, плотность вероятности отказов (частота отказов) $f(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$, среднее время безотказной работы (средняя наработка до отказа) T_{cp} .

Вероятность безотказной работы $P(t)$ есть вероятность того, что время работы системы до отказа T окажется больше заданного времени t .

$$P(t) = P(T > t) = 1 - Q(t);$$

$$P(t) = \int_{t-T}^{\infty} f(t) dt,$$

где T – случайное время работы системы до отказа или наработка на отказ;
 $Q(t) = P(T < t)$ – интегральная функция распределения случайной величины T .

Иногда пользуются понятием вероятности отказов $Q(t)$:

$$Q(t) = F(t) = 1 - P(t).$$

Если $P(t)$ характеризует надежность системы, то $Q(t)$ характеризует ненадежность системы.

Плотность распределения времени безотказной работы (частота отказов), является дифференциальной функцией распределения.

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

Интенсивность отказа $\lambda(t)$ – это отношение плотности вероятности отказов к вероятности безотказной работы:

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

$$P(t) = e^{-\int \lambda(t)dt}; \quad P(t) = e^{-\lambda t} \text{ при } \lambda = const.$$

Среднее время безотказной работы системы – это математическое ожидание времени работы системы до отказа:

$$T_{cp} = M(T_0) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

На рисунке 1 изображена зависимость вероятности безотказной работы от времени. В начальный момент вероятность P равна единице. В конце времени работы системы вероятность равна нулю.

Показатели надежности функционально связаны между собой: зная одну из функций $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, можно определить три остальные.

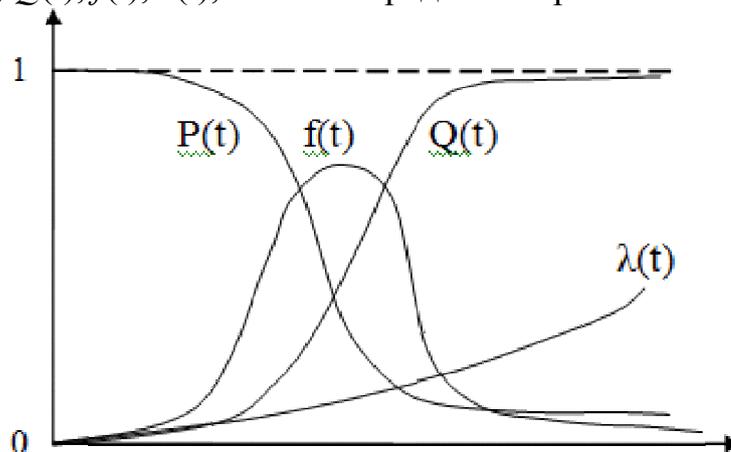


Рисунок 1 - Зависимость вероятности безотказной работы, вероятности отказов, частоты отказов и интенсивности отказов от времени

Статистические показатели надежности невосстанавливаемых систем зачастую получают из экспериментальных данных.

Статистическая вероятность безотказной работы

$$\bar{P} = \frac{N_0 - n}{N_0},$$

где N_0 – число объектов в начале испытаний; n – число объектов, отказавших за время Δt ; Δt – время испытаний.

Под *статистической частотой отказов* элементов понимают число отказов в единицу времени, отнесенное к первоначальному количеству поставленных на испытания элементов. При этом отказавшие в процессе испытаний элементы не заменяются новыми, и число работающих элементов постепенно уменьшается.

$$\bar{f} = \frac{n}{N_0 \Delta t},$$

где n – число отказов в интервале времени Δt ; N_0 – число испытуемых элементов; Δt – время испытаний.

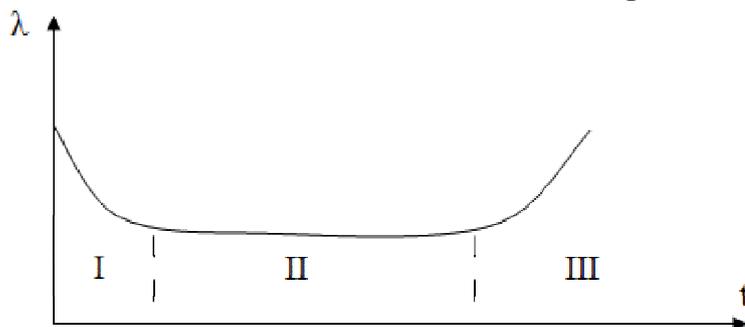
В отличие от частоты отказов, интенсивность отказов характеризует надежность объекта в данный момент времени, т. е. его локальную надежность.

Под *статистической интенсивностью отказов* понимают число отказов в единицу времени, отнесенное к среднему числу элементов, безотказно работающих в данный промежуток времени. При этом отказавшие элементы не заменяются.

$$\bar{\lambda} = \frac{n}{N_{cp} \Delta t},$$

где n – число отказов в интервале времени Δt ; N_{cp} – среднеарифметическое число работоспособных элементов между началом и концом времени испытаний; Δt – время испытаний.

Интенсивность отказов в течение длительной эксплуатации не остается постоянной. В начальный период времени λ имеет большее значение вследствие скрытых дефектов, не обнаруженных из-за несовершенства производственного контроля и возможных нарушений правил эксплуатации при первоначальной наладке объекта. Затем значение интенсивности отказов уменьшается и остается почти постоянным в течение длительного срока. В конце срока службы λ возрастает из-за старения элементов устройства. На рисунке 2 изображена зависимость интенсивности отказов от времени.



I – приработка, II – нормальная эксплуатация, III – старение
Рисунок 2 - Зависимость интенсивности отказов от времени

Статистическое среднее время безотказной работы (англ. Mean time to failure, МТТФ) или средняя наработка до отказа определится по данным испытаний, как

$$\bar{T}_0 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N_0},$$

где t_i – время исправной работы i -го элемента; N_0 – число испытываемых элементов.

При большом количестве элементов используется другой способ вычисления среднего времени:

$$\bar{T}_0 = \frac{\sum_{i=1}^K n_i t_{cpi}}{N_0},$$

где n_i – количество вышедших из строя изделий в i -ом интервале времени; t_{cpi} – среднеарифметическое время исправной работы элемента в i -ом интервале времени; N_0 – число испытываемых элементов.

Основные показатели надежности восстанавливаемых (ремонтруемых) систем

Для восстанавливаемых систем характерно чередование времени исправной работы и времени восстановления (ремонтов).

Система, проработав случайное время t_{p1} , выходит из строя. После отказа происходит восстановление в течение времени t_{e1} , и система работает вновь время t_{p2} до отказа (рисунок 3). Этот процесс продолжается неограниченно до наступления предельного состояния.

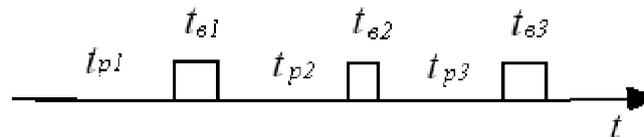


Рисунок 3 – Чередование времени исправной работы и времени восстановления некоторой системы

Полагаем, что время восстановления пренебрежимо мало по сравнению со временем работы. Можно считать, что восстановление происходит мгновенно. Отказавший, испорченный элемент немедленно заменяется новым. Элемент после восстановления имеет такую же надежность, что и в начальный момент.

Поток отказов восстанавливаемой системы является простейшим, пуассоновским. Для ремонтируемых объектов удобным для практики критерием надежности является *среднее время работы между двумя соседними отказами* (англ. Mean time between failures, МТВФ) или *наработка на отказ* T_0 .

Значения этого параметра определяются по результатам обработки статистического материала, полученного в ходе эксплуатации или экспериментов. Если устройство проработало суммарное время t_{Σ} и имело при этом n отказов в работе, то наработка на отказ

$$\bar{T}_0 = \frac{t_\Sigma}{n}.$$

Если испытывались N однотипных объектов, то необходимо просуммировать время исправной работы по всем объектам и разделить его на общее число отказов:

$$\bar{T}_0 = \frac{\sum_{i=1}^N t_{\Sigma i}}{\sum_{i=1}^N n_i}.$$

Для восстанавливаемых (ремонтируемых) систем *интенсивность отказов* определяется формулой

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\bar{T}_0}.$$

Параметром потока отказов (средняя скорость изменения числа отказов) $\omega(t)$ называется производная среднего числа отказов объекта в момент t . Статистически параметр потока отказов определяется как отношение числа отказавших образцов техники в единицу времени к числу образцов, поставленных на испытание при условии, что отказавшие образцы заменяются исправными или отремонтированными:

$$\bar{\omega} = \frac{n(t, (t + \Delta t))}{N_0 \Delta t},$$

где $n(t, (t + \Delta t))$ – число отказов в интервале времени $(t, (t + \Delta t))$; N_0 – число испытываемых элементов; Δt – время испытаний.

Параметр потока отказов $\omega(t)$ обладает следующими важными свойствами:

1) для любого момента времени независимо от закона распределения времени безотказной работы параметр потока отказов больше, чем частота отказов, т.е. $\omega(t) > f(t)$;

2) независимо от вида функций $f(t)$ параметр потока отказов $\omega(t)$ при $t \rightarrow \infty$ стремится к $1/T_{cp}$. Это важное свойство параметра потока отказов означает, что при длительной эксплуатации ремонтируемого изделия поток его отказов независимо от закона распределения времени безотказной работы становится стационарным. Однако это вовсе не означает, что интенсивность отказов есть величина постоянная;

3) если $\lambda(t)$ – возрастающая функция времени, то $\lambda(t) > \omega(t) > f(t)$, если $\lambda(t)$ – убывающая функция, то $\omega(t) > \lambda(t) > f(t)$;

4) при $\lambda(t) \neq \text{const}$ параметр потока отказов системы не равен сумме параметров потока отказов элементов. Это свойство параметра потока отказов позволяет утверждать, что при вычислении количественных характеристик надежности сложной системы нельзя суммировать имеющиеся в настоящее время значения интенсивности отказов элементов, полученных по статистическим данным об отказах изделий в условиях эксплуатации, так как указанные величины являются фактически параметрами потока отказов;

5) при $\lambda(t) = \text{const}$ параметр потока отказов равен интенсивности отказов $\omega(t) = \lambda(t)$.

Из рассмотрения свойств интенсивности и параметра потока отказов видно, что эти характеристики различны. В настоящее время широко используются статистические данные об отказах, полученные в условиях эксплуатации оборудования. При этом они часто обрабатываются таким образом, что приводимые характеристики надежности являются не интенсивностью отказов, а параметром потока отказов $\omega(t)$. Это вносит ошибки при расчетах надежности. В ряде случаев они могут быть значительными.

Определение показателей долговечности

Назначенный предельный ресурс – назначенная заводом-изготовителем суммарная наработка элемента, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена, а изделие заменено.

Эксплуатационный ресурс – суммарная наработка элемента до предельного состояния в реальных условиях эксплуатации. Предельный эксплуатационный ресурс не всегда совпадает с назначенным заводом ресурсом, так как в реальных условиях эксплуатации наблюдаются колебания режимов, отклонения в технологии ремонтов и т.д.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации элемента до момента возникновения предельного состояния, оговоренного в технической документации, или до списания.

Определение значений показателей ремонтпригодности

Восстановление отказавшего элемента часто требует времени, которым нельзя пренебречь.

Вероятность восстановления – вероятность того, что фактически продолжительность работ по восстановлению работоспособности однотипных элементов не превысит заданную.

$$P_B(t) = \frac{n'}{n},$$

где n' – число элементов, время восстановления работоспособности которых не превысило заданного в рассматриваемый период; n – суммарное число отказавших элементов.

Среднее время восстановления системы T_B – это математическое ожидание продолжительности восстановления системы после отказа, т. е. среднее время вынужденного, нерегламентированного простоя, вызванного отысканием и устранением отказа.

$$T_B = M(T_B) = \int_0^{\infty} t \cdot P_B dt = \int_0^{\infty} (1 - F(t)) dt.$$

где P_B – плотность вероятности времени восстановления; F_B – функция распределения времени восстановления.

Формула для статистической оценки времени восстановления T_B :

$$\bar{T}_B = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^N t_{Bi},$$

где N_B – число восстановлений системы; t_{Bi} – время восстановления (ремонта) системы после i -го отказа.

При оценке ремонтпригодности используется также средняя продолжительность внепланового и планового ремонта.

Среднее время внепланового (планового) ремонта – математическое ожидание случайной продолжительности внепланового (планового) восстановления работоспособности элемента, определяется:

$$\bar{T}_{BP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{BPi};$$

$$\bar{T}_{PP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{PPi},$$

где T_{BP} – время i -го внепланового ремонта системы; T_{PP} – время i -го планового ремонта системы; N – число ремонтов.

Показатель сохраняемости

Назначенный срок хранения – календарная продолжительность хранения, по истечении которой применение объекта не допускается (независимо от его технического состояния).

Комплексные показатели надежности

Основной характеристикой восстанавливаемой системы является коэффициент готовности. *Коэффициент готовности* K_G для установившегося режима эксплуатации определяется как вероятность того, что система будет исправна в произвольно выбранный момент в промежутках между плановыми техническими обслуживаниями

$$K_G = \frac{T_0}{T_0 + T_B},$$

где T_0 – средняя наработка на отказ; T_B – среднее время восстановления.

Коэффициент технического использования – это отношение времени пребывания объекта в работоспособном состоянии к сумме времени пребывания в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонтов.

$$K_{ТИ} = \frac{\sum T_0}{\sum T_0 + \sum T_B + \sum T_{ТО}},$$

где $\sum T_0$ – суммарная наработка;

$\sum T_B$ – суммарное время простоев из-за ремонтов;

$\sum T_{ТО}$ – суммарное время простоев из-за техобслуживания.

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект в произвольный момент времени, кроме планируемых перерывов, окажется работоспособным, когда требуется его применение по назначению, и с данного момента будет работать безотказно в течение заданного времени:

$$K_{ог} = K_{г} P(t).$$

Рекомендации по практическому использованию показателей надежности при оценке и обеспечения надежности состоят в следующем:

Показатели надежности АС имеют характер системы показателей. Чем больше показателей используется при исследовании надежности системы, тем более адекватными становятся результаты исследования. Это не означает, что всякий раз либо при задании требований по надежности, либо при оценке готовых решений по обеспечению надежности системы надо использовать всю номенклатуру возможных показателей надежности.

Перечень используемых показателей должен отвечать требованию целесообразности, т. е. должен соответствовать задаче объективной оценки требуемых надежностных свойств системы. В составе единичных показателей надежности при решении конкретной задачи следует выделять главные и вспомогательные показатели. При всех случаях главными показателями для АС являются те показатели, которые характеризуют безотказность, живучесть и достоверность. Сложный по своей структуре, многофункциональный комплекс технических средств, реализующий ряд рабочих режимов (двухмашинный режим дублирования или резервирования), требует также использования комплексных показателей для оценки надежности.

Количественные значения показателей надежности АС приходится задавать с учетом двух противоречивых требований:

- 1) значение показателя должно быть не ниже некоторого уровня;
- 2) значение показателя не должно превышать обоснованный уровень, так как это не может быть обеспечено возможностями производства технических средств и программного обеспечения, профотбором и подготовкой персонала или окажется слишком дорогостоящим.

Содержание каждого показателя надежности всякий раз должно быть четко определено для системы, ее основных частей и элементов на понятном для заказчика и разработчика общем языке.