

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный
университет (СибАДИ)»

И.В. Лазута

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Конспект лекций

Омск
СибАДИ
2018

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 надежностных 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:

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

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.

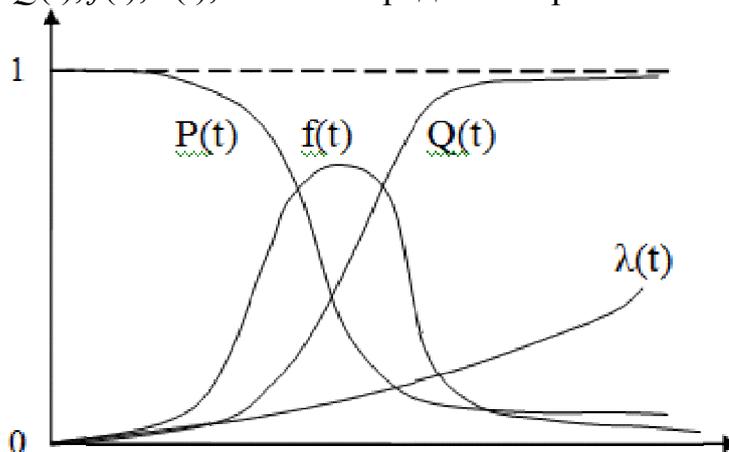


Рисунок 1 - Зависимость вероятности безотказной работы, вероятности отказов, частоты отказов и интенсивности отказов от времени

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.

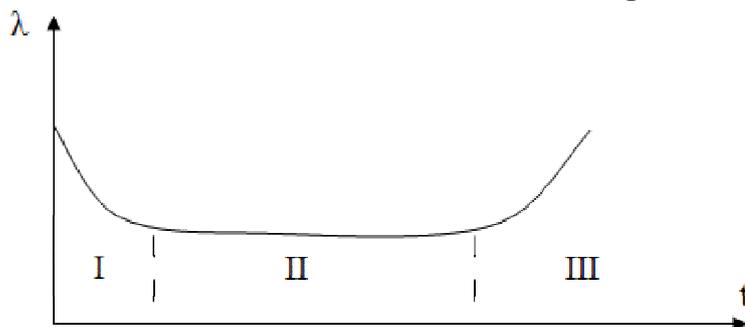
В отличие от частоты отказов, интенсивность отказов характеризует надежность объекта в данный момент времени, т. е. его локальную надежность.

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.

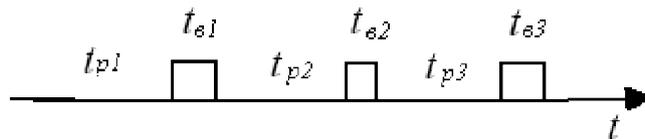


Рисунок 3 – Чередование времени исправной работы и времени восстановления некоторой системы

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:

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

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

где T_{BP} – время i -го внепланового ремонта системы; $T_{ПП}$ – 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:

$$K_{OG} = K_G P(t).$$

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.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

2.1. Характеристика потоков отказов и восстановлений

При анализе надежности важным этапом является четкая формулировка критерия отказа. Отсутствие полных сведений о воздействии на систему или на его отдельный элемент приводит к вероятностному характеру отказов. Сам факт отказа – явление детерминированное, а время его появления – величина случайная. Поэтому основным математическим аппаратом теории надежности является теория вероятности и математическая статистика.

Для современных систем автоматизации характерны потоки отказов и восстановлений как последовательная смена состояний объектов во времени. Необходимо отметить, что слово «*поток*» не означает наличие большого количества отказов. Данный термин применяется при изучении закономерностей появления случайных событий. Современные же технические системы отличаются высокой надежностью и отказы для них крайне редкие события. В то же время изучение природы возникновения отказов, прогнозирование поведения системы при отказах отдельных элементов, определение параметров надежности систем является в настоящее время важной задачей, направленной на повышение эффективности и обеспечение безопасности сложных технических систем.

Под *потоком событий* понимается такая последовательность событий, при которой они происходят одно за другим в случайные моменты времени. Основными потоками событий, изучаемыми в теории надежности, являются *потоки отказов и восстановлений*. Наибольшее применение получили *простейшие потоки и потоки Эрланга*.

Простейшим потоком событий называется поток, удовлетворяющий условиям *стационарности, ординарности и отсутствия последствий*.

Стационарность потоков отказов означает, что вероятность появления определенного числа отказов за определенный промежуток времени не зависит от того, на какой момент данного промежутка приходятся эти отказы, а зависит только от длительности промежутка, т.е. плотность потока появления отказов постоянна во времени.

Ординарным считается такой поток, в котором вероятность появления одновременно двух и более отказов за небольшой промежуток времени крайне мала по сравнению с вероятностью возникновения одного отказа.

Отсутствие последствий означает, что вероятность возникновения фиксированного числа отказов на определенном интервале времени не зависит от того, сколько отказов возникло ранее. Другими словами отказы являются событиями случайными и независимыми друг от друга.

Поток Пальма – стационарный ординарный поток однородных событий, для которого число событий в интервале Δt не зависит от чисел событий в любых интервалах, не пересекающихся с Δt . Если поток Пальма характеризуется постоянным параметром распределения λ , то такой поток является простейшим и описывается распределением Пуассона.

Поток отказов элементов сложных систем достаточно часто являются нестационарными. Нестационарный поток, удовлетворяющий одновременно условиям ординарности и отсутствия последствий называется нестационарным потоком Пуассона. Такие потоки характерны в периоды приработки системы и при работе элементов сложной системы не одновременно.

Нарушение условий стационарности или наличие последствий приводит к тому, что поток перестает быть простейшим. Один из видов не простейшего потока – *потоки Эрланга*.

Потоком Эрланга k -го порядка называется поток, получившийся в результате сохранения каждого k -го события в простейшем потоке. Т.е. в простейшем потоке отмечаются только k -е события, а остальные отбрасываются, в результате получается новый поток событий (Поток Эрланга).

В случае $k = 1$ поток Эрланга превращается в простейший. С увеличением числа k последствия возрастают. При $k \rightarrow \infty$ поток приближается к регулярному потоку с постоянным интервалом между событиями.

Дифференциальный закон распределения потока Эрланга следующий:

$$f_k(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda t}$$

Интенсивность отказов при потоке Эрланга:

$$\lambda_k = \frac{\lambda}{k}$$

Математическое ожидание времени между событиями (наработка до/на отказа):

$$M(T_k) = T_k = \frac{1}{\lambda_k}$$

2.2. Основные виды законов распределения случайных величин, используемых в теории надежности

Надежность технологической системы зависит от множества фактов и явлений. Математические модели надежности, используемые на практике, представляют собой простые законы распределения, выражаемые элементарными функциями или интегралами от этих функций. Показатели надежности при этом являются некоторыми функциями математической модели; их определение, как правило, включает три этапа:

- установление типа модели (закона распределения);
- оценка параметров распределения;
- определение показателей надежности на основании модели.

При построении моделей и определении параметров надежности используют опытные данные или физико-статистическую теорию. Распределения, применяемые в качестве моделей надежности, бывают дискретными и непрерывными. Теория вероятностей дает широкий выбор различных законов распределения случайных величин, которые могут быть использованы и для решения задач надежности.

Дискретной (прерывной) называется случайная величина, которая принимает отдельные, изолированные возможные значения с определенной вероятностью.

Непрерывной называют случайную величину, которая может принимать все значения из некоторого конечного или бесконечного промежутка.

Примером дискретных случайных величин являются: число отказов или число восстановленных объектов за заданное время. Пример непрерывных случайных величин – наработка объекта до отказа, наработка между отказами, время восстановления ресурсов и т.д. В связи с этим распределения, применяемые в качестве моделей надежности, бывают дискретными и непрерывными.

Для задания дискретной случайной величины необходимо задать не только значения этих величин, но и вероятности. Законом распределения дискретной случайной величины называется соответствие между возможными значениями и их вероятностями, которое может быть задано таблично (таблица 3), аналитически и графически.

Таблица 3 – Табличная форма задания закона распределения дискретной случайной величины

X	X_1	X_2	...	X_n
P	P_1	P_2	...	P_n

В случае когда величина X приняла все возможные значения, сумма вероятностей равна или стремится к 1.

Законы распределения для дискретных величин

1. Биномиальный закон Бернулли

Это распределение числа n появлений некоторого события A в m опытах. Если вероятность появления события A в одном опыте равна P , то вероятность появления n событий в m опытах:

$$Q_m^n = C_m^n Q^n (1 - Q)^{m-n},$$

где C_m^n – число сочетаний из m по n .

$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!}.$$

Свойства биномиального закона:

а) математическое ожидание числа событий в m опытах:

$$M[m] = m \cdot P.$$

б) среднеквадратическое отклонение числа событий в m опытах:

$$\sigma = \sqrt{m \cdot P(t)Q(t)}.$$

2. Закон Пуассона

Это распределение числа событий n за время t .

$$Q_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$$

Свойства закона Пуассона:

а) математическое ожидание числа событий за время t :

$$M[n] = \lambda \cdot t.$$

б) среднеквадратическое отклонение числа событий за время t :

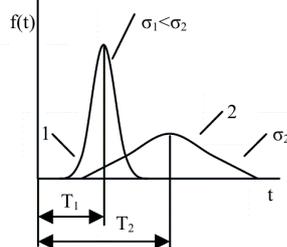
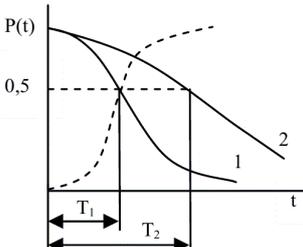
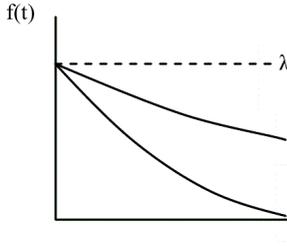
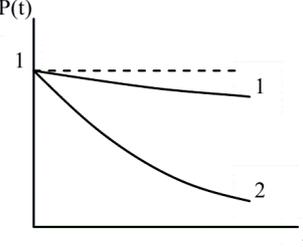
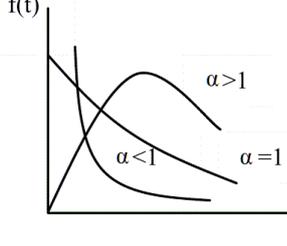
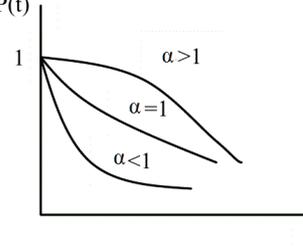
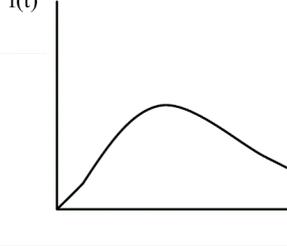
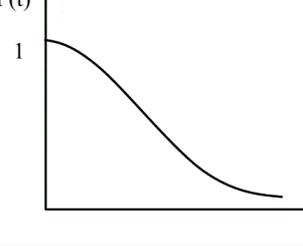
$$\sigma = \sqrt{\lambda t}.$$

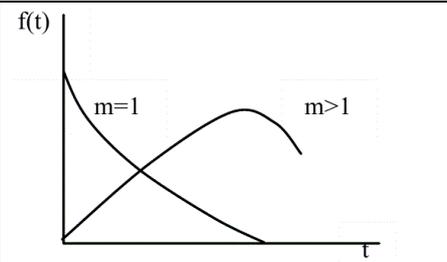
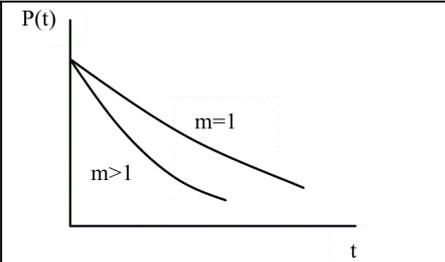
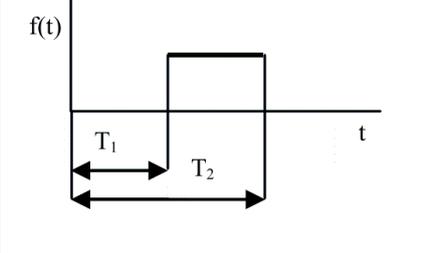
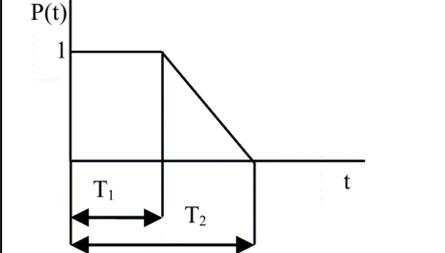
Распределение Пуассона соответствует простейшему закону отказов (отсутствует закономерность между отказами, т.е. отказы независимы).

Законы распределения для непрерывных величин

К непрерывным случайным величинам могут быть отнесены наработка на отказ, наработка между двумя отказами, время восстановления, ресурс. В таблице 4 приведены законы распределения, получившие наибольшее применение в теории надежности.

Таблица 4 – Типовые характеристики основных законов распределения

Закон	Частота отказов $f(t)$	Вероятности $P(t)$ и $Q(t)$
Нормальный (Гаусса)		
Экспоненциальный (показательный)		
Вейбулла		
Релея		

Гамма-распределение		
Равномерное распределение		

1. *Нормальный закон распределения* (распределение Гаусса) характерен для естественных природных явлений и процессов. Например, следующие случайные величины хорошо моделируются нормальным распределением: погрешности измерения; размера и форм деталей; точности стрельбы и т.д.

Плотность вероятности (частота) отказов:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}}.$$

Она зависит от двух параметров: среднего значения времени работы до отказа T_0 и среднеквадратичного отклонения наработки на отказ σ . Плотность нормального распределения имеет колоколообразную форму, симметричную относительно среднего значения T_0 .

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = 0,5 - \Phi(z) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - T_0}{\sigma}\right),$$

где $\Phi(x)$ – табулированная функция Лапласа (табл. 5).

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

где x – положительное целое или дробное число.

Таблица 5 – Значения функции Лапласа

x	$\Phi(x)$										
0,00	0,00000	0,50	0,19146	1,00	0,34134	1,50	0,43319	2,00	0,47725	3,00	0,49865
0,01	0,00399	0,51	0,19497	1,01	0,34375	1,51	0,43448	2,02	0,47831	3,05	0,49886
0,02	0,00798	0,52	0,19847	1,02	0,34614	1,52	0,43574	2,04	0,47932	3,10	0,49903
0,03	0,01197	0,53	0,20194	1,03	0,34849	1,53	0,43699	2,06	0,48030	3,15	0,49918
0,04	0,01595	0,54	0,20540	1,04	0,35083	1,54	0,43822	2,08	0,48124	3,20	0,49931
0,05	0,01994	0,55	0,20884	1,05	0,35314	1,55	0,43943	2,10	0,48214	3,25	0,49942
0,06	0,02392	0,56	0,21226	1,06	0,35543	1,56	0,44062	2,12	0,48300	3,30	0,49952
0,07	0,02790	0,57	0,21566	1,07	0,35769	1,57	0,44179	2,14	0,48382	3,35	0,49960

0,08	0,03188	0,58	0,21904	1,08	0,35993	1,58	0,44295	2,16	0,48461	3,40	0,49966
0,09	0,03586	0,59	0,22240	1,09	0,36214	1,59	0,44408	2,18	0,48537	3,45	0,49972
0,10	0,03983	0,60	0,22575	1,10	0,36433	1,60	0,44520	2,20	0,48610	3,50	0,49977
0,11	0,04380	0,61	0,22907	1,11	0,36650	1,61	0,44630	2,22	0,48679	3,55	0,49981
0,12	0,04776	0,62	0,23237	1,12	0,36864	1,62	0,44738	2,24	0,48745	3,60	0,49984
0,13	0,05172	0,63	0,23565	1,13	0,37076	1,63	0,44845	2,26	0,48809	3,65	0,49987
0,14	0,05567	0,64	0,23891	1,14	0,37286	1,64	0,44950	2,28	0,48870	3,70	0,49989
0,15	0,05962	0,65	0,24215	1,15	0,37493	1,65	0,45053	2,30	0,48928	3,75	0,49991
0,16	0,06356	0,66	0,24537	1,16	0,37698	1,66	0,45154	2,32	0,48983	3,80	0,49993
0,17	0,06749	0,67	0,24857	1,17	0,37900	1,67	0,45254	2,34	0,49036	3,85	0,49994
0,18	0,07142	0,68	0,25175	1,18	0,38100	1,68	0,45352	2,36	0,49086	3,90	0,49995
0,19	0,07535	0,69	0,25490	1,19	0,38298	1,69	0,45449	2,38	0,49134	3,95	0,49996
0,20	0,07926	0,70	0,25804	1,20	0,38493	1,70	0,45543	2,40	0,49180	4,00	0,49997
0,21	0,08317	0,71	0,26115	1,21	0,38686	1,71	0,45637	2,42	0,49224	4,05	0,49997
0,22	0,08706	0,72	0,26424	1,22	0,38877	1,72	0,45728	2,44	0,49266	4,10	0,49998
0,23	0,09095	0,73	0,26730	1,23	0,39065	1,73	0,45818	2,46	0,49305	4,15	0,49998
0,24	0,09483	0,74	0,27035	1,24	0,39251	1,74	0,45907	2,48	0,49343	4,20	0,49999
0,25	0,09871	0,75	0,27337	1,25	0,39435	1,75	0,45994	2,50	0,49379	4,25	0,49999
0,26	0,10257	0,76	0,27637	1,26	0,39617	1,76	0,46080	2,52	0,49413	4,30	0,49999
0,27	0,10642	0,77	0,27935	1,27	0,39796	1,77	0,46164	2,54	0,49446	4,35	0,49999
0,28	0,11026	0,78	0,28230	1,28	0,39973	1,78	0,46246	2,56	0,49477	4,40	0,49999
0,29	0,11409	0,79	0,28524	1,29	0,40147	1,79	0,46327	2,58	0,49506	4,45	0,50000
0,30	0,11791	0,80	0,28814	1,30	0,40320	1,80	0,46407	2,60	0,49534	4,50	0,50000
0,31	0,12172	0,81	0,29103	1,31	0,40490	1,81	0,46485	2,62	0,49560	4,55	0,50000
0,32	0,12552	0,82	0,29389	1,32	0,40658	1,82	0,46562	2,64	0,49585	4,60	0,50000
0,33	0,12930	0,83	0,29673	1,33	0,40824	1,83	0,46638	2,66	0,49609	4,65	0,50000
0,34	0,13307	0,84	0,29955	1,34	0,40988	1,84	0,46712	2,68	0,49632	4,70	0,50000
0,35	0,13683	0,85	0,30234	1,35	0,41149	1,85	0,46784	2,70	0,49653	4,75	0,50000
0,36	0,14058	0,86	0,30511	1,36	0,41309	1,86	0,46856	2,72	0,49674	4,80	0,50000
0,37	0,14431	0,87	0,30785	1,37	0,41466	1,87	0,46926	2,74	0,49693	4,85	0,50000
0,38	0,14803	0,88	0,31057	1,38	0,41621	1,88	0,46995	2,76	0,49711	4,90	0,50000
0,39	0,15173	0,89	0,31327	1,39	0,41774	1,89	0,47062	2,78	0,49728	4,95	0,50000
0,40	0,15542	0,90	0,31594	1,40	0,41924	1,90	0,47128	2,80	0,49744	5,00	0,50000
0,41	0,15910	0,91	0,31859	1,41	0,42073	1,91	0,47193	2,82	0,49760		
0,42	0,16276	0,92	0,32121	1,42	0,42220	1,92	0,47257	2,84	0,49774		
0,43	0,16640	0,93	0,32381	1,43	0,42364	1,93	0,47320	2,86	0,49788		
0,44	0,17003	0,94	0,32639	1,44	0,42507	1,94	0,47381	2,88	0,49801		
0,45	0,17364	0,95	0,32894	1,45	0,42647	1,95	0,47441	2,90	0,49813		
0,46	0,17724	0,96	0,33147	1,46	0,42785	1,96	0,47500	2,92	0,49825		
0,47	0,18082	0,97	0,33398	1,47	0,42922	1,97	0,47558	2,94	0,49836		
0,48	0,18439	0,98	0,33646	1,48	0,43056	1,98	0,47615	2,96	0,49846		
0,49	0,18793	0,99	0,33891	1,49	0,43189	1,99	0,47670	2,98	0,49856		

Свойства функции Лапласа:

- $\Phi(0) = 0$;
- $\Phi(\infty) = 0,5$;
- $\Phi(-x) = -\Phi(x)$.

Вероятность попадания времени работы до отказа T_0 в заданный интервал значений от t_1 до t_2 вычисляются по формуле

$$P(t_1 < T_0 < t_2) = \Phi\left(\frac{t_2 - T_0}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - T_0}{\sigma}\right).$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{1}{(0,5 - \Phi(t))\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}}.$$

Нормальный закон рекомендуется применять при постепенных отказах, особенно тогда, когда начальное значение параметра имеет большую дисперсию, а его изменение во времени протекает достаточно стабильно.

2. *Экспоненциальный закон распределение* характеризует время безотказной работы большого числа элементов. В первую очередь это относится к элементам радиоэлектронной аппаратуры, а также к машинам, эксплуатируемым в период после окончания приработки и до существенного проявления постепенных отказов. Оно используется в задачах массового обслуживания, в которых речь идет об интервалах времени между телефонными звонками, или между моментами поступления техники в ремонтную мастерскую, или между моментами обращения клиентов.

Экспоненциальный закон является однопараметрическим, удобным для расчетов надежности, особенно для сложных расчлененных систем, и широко применяется при решении различных задач. Для этого закона используют формулы:

$$\begin{aligned} f(t) &= \lambda e^{-\lambda t}; \\ P(t) &= e^{-\lambda t}; \\ \lambda &= \text{const}. \end{aligned}$$

Экспоненциальное распределение хорошо описывает случай, когда вероятность отказа не зависит от длительности предыдущего использования изделия, т.е. когда возникают в основном внезапные, а не постепенные отказы.

3. *Закону Вейбулла* хорошо подчиняется распределение отказов в объектах, содержащих большое количество однотипных неремонтируемых элементов (полупроводниковых приборов, микромодулей и т. д.).

Согласно распределению Вейбулла, плотность распределения вероятности безотказной работы (частота отказов) определяется по формуле

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

где α и β – параметры формы и масштаба.

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}.$$

Средняя наработка до отказа:

$$T_0 = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right).$$

где $\Gamma(z)$ – табулированная гамма-функция (табл. 6).

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt,$$

где z – положительное целое или дробное число.

Таблица 6 – Значения гамма-функции

z	$\Gamma(z)$	z	$\Gamma(z)$	z	$\Gamma(z)$	z	$\Gamma(z)$
1,00	1,0000	1,25	0,9064	1,50	0,8862	1,75	0,9191
1,01	0,9943	1,26	0,9044	1,51	0,8866	1,76	0,9214
1,02	0,9888	1,27	0,9025	1,52	0,8870	1,77	0,9238
1,03	0,9835	1,28	0,9007	1,53	0,8876	1,78	0,9262
1,04	0,9784	1,29	0,8990	1,54	0,8882	1,79	0,9288
1,05	0,9735	1,30	0,8975	1,55	0,8889	1,80	0,9314
1,06	0,9687	1,31	0,8960	1,56	0,8896	1,81	0,9341
1,07	0,9642	1,32	0,8946	1,57	0,8905	1,82	0,9368
1,08	0,9597	1,33	0,8934	1,58	0,8914	1,83	0,9397
1,09	0,9555	1,34	0,8922	1,59	0,8924	1,84	0,9426
1,10	0,9514	1,35	0,8912	1,60	0,8935	1,85	0,9456
1,11	0,9474	1,36	0,8902	1,61	0,8947	1,86	0,9187
1,12	0,9436	1,37	0,8893	1,62	0,8959	1,87	0,9518
1,13	0,9399	1,38	0,8885	1,63	0,8972	1,88	0,9551
1,14	0,9364	1,39	0,8879	1,64	0,8986	1,89	0,9584
1,15	0,9330	1,40	0,8873	1,65	0,9001	1,90	0,9618
1,16	0,9298	1,41	0,8868	1,66	0,9017	1,91	0,9652
1,17	0,9267	1,42	0,8864	1,67	0,9033	1,92	0,9688
1,18	0,9237	1,43	0,8860	1,68	0,9050	1,93	0,9724
1,19	0,9209	1,44	0,8858	1,69	0,9068	1,94	0,9761
1,20	0,9182	1,45	0,8857	1,70	0,9086	1,95	0,9799
1,21	0,9156	1,46	0,8856	1,71	0,9106	1,96	0,9837
1,22	0,9131	1,47	0,8856	1,72	0,9126	1,97	0,9877
1,23	0,9108	1,48	0,8857	1,73	0,9147	1,98	0,9917
1,24	0,9030	1,49	0,8859	1,74	0,9168	1,99	0,9959
						2,0000	1,0000

Свойства гамма-функции:

- $\Gamma(z + 1) = z \cdot \Gamma(z)$;
- $\Gamma(1 - z) \Gamma(z) = \frac{\pi}{\sin(\pi z)}$.
- $\Gamma(z) = (z + 1)!$ для целых положительных z .

Среднеквадратическое отклонение среднего времени безотказной работы:

$$\sigma = \beta \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}.$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1}.$$

Универсальность распределения Вейбулла объясняется его коэффициентами. При $\alpha = 1$ распределение превращается в экспоненциальное, при $\alpha < 1$ функции плотности и интенсивности отказов убывающие (период приработки системы), при $\alpha > 1$ интенсивность отказов возрастающая (период старения системы). При $\alpha = 3,3$ распределение Вейбулла близко к нормальному, а при $\alpha = 2$ функция $\lambda(t)$ линейная и распределение Вейбулла превращается в распределение Рэлея с плотностью:

$$f(t) = 2\lambda t e^{-\lambda t^2}.$$

4. *Распределение Релея* является однопараметрическим и асимметричным и удобно для описания распределения положительных случайных величин, хотя и обладает значительно меньшей универсальностью, чем предыдущее. Основные зависимости распределения Релея:

$$f(t) = \frac{t}{C^2} e^{-\frac{t^2}{2C^2}};$$

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2C^2}};$$

$$\lambda(t) = \frac{t}{C^2};$$

$$T_0 = C \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Значение параметра распределения C полностью определяет данный закон.

5. *Гамма-распределение* имеет два положительных параметра – α и β . Если α целое число, это распределение иногда называют распределением Эрланга. В этом случае распределение Эрланга можно считать композицией из α независимых случайных величин, имеющих одинаковое экспоненциальное распределение с параметром β . Основные зависимости гамма-распределения:

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

где α и β – параметры формы и масштаба, $\Gamma(\alpha)$ – табулированная гамма-функция.

Вероятность безотказной работы

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

Средняя наработка до отказа:

$$T_0 = \alpha \cdot \beta.$$

Среднеквадратическое отклонение среднего времени безотказной работы:

$$\sigma = \beta \sqrt{\alpha}.$$

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

6. *Равномерное распределение.*

При данном распределении все события (отказы) совершаются за отрезок времени от $t = T_1$ до $t = T_2$, и вероятность их появления одинакова для любых одинаковых промежутков времени внутри данного отрезка. Поэтому:

$$f(t) = \frac{1}{T_2 - T_1} = \text{const} \text{ при } T_1 \leq t \leq T_2;$$

$$P(t) = \frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \text{ при } T_1 \leq t \leq T_2.$$

Равномерное распределение может заменить экспоненциальное при $T_1 = 0$ и значениях $P(t) > 0,9$ (линеаризация экспоненты).

Основная задача при расчете показателей надежности заключается в том, чтобы получить такое распределение, которое с высокой степенью достоверности отражало бы события и процессы, приводящие к отказам изделия.

2.3. *Зависимости вероятностей событий*

События могут быть совместными и несовместными. Два события называют несовместными, если в результате опыта они не могут появиться одновременно. И наоборот, события считаются совместными, если они появляются одновременно в результате такого опыта.

Вероятность суммы двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A + B) = P(A) + P(B).$$

Метод полной индукции позволяет использовать теорему сложения для произвольного числа несовместных событий. Так, *вероятность суммы нескольких событий* равна сумме вероятностей этих событий

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n).$$

С л е д с т в и е 1. Если события A_1, A_2, \dots, A_n образуют полную группу несовместных событий, то сумма их вероятностей равна единице:

$$\sum_i P(A_i) = 1,$$

Противоположными событиями называют два несовместных события, образующих полную группу.

С л е д с т в и е 2. *Сумма вероятностей противоположных событий A и A^* равна единице:*

$$P(A) + P(A^*) = 1$$

Вероятность суммы двух совместных событий A и B выражается формулой

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB).$$

Аналогично *вероятность суммы трех совместных событий* определяется выражением

$$P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(AB) - P(AC) - P(BC) - P(ABC).$$

Аналогичную формулу можно написать для *произведения двух событий*:

$$P(AB) = P(A) + P(B) - P(A+B)$$

и для *произведения трех событий*:

$$P(ABC) = P(A) + P(B) + P(C) - P(AB) - P(AC) - P(BC) - P(A+B+C).$$

Данные формулы находят практическое применение при преобразовании различных выражений, содержащих вероятности сумм и произведений событий. В зависимости от специфики задачи в некоторых случаях удобнее бывает использовать только суммы, а в других только произведения событий.

События могут быть независимыми и зависимыми.

Событие A называют *независимым* от события *B*, если вероятность события *A* не зависит от того, произошло событие *B* или нет.

Событие A называют *зависимым* от события *B*, если вероятность события *A* меняется в зависимости от того, произошло событие *B* или нет.

Понятие зависимости и независимости событий можно наглядно показать на следующих примерах.

Пример. Предположим, что опыт состоит в бросании двух монет, при этом рассматривают следующие события: событие *A* — появление герба на первой монете и событие *B* — появление герба на второй монете.

В этом случае вероятность события *A* не зависит от того, произошло событие *B* или нет, следовательно, событие *A* независимо от события *B*.

Пример. Пусть в урне имеется два белых и один черный шар. Два человека вынимают из урны по одному шару, при этом рассматриваются следующие события: событие *A* — появление белого шара у первого человека и событие *B* — появление белого шара у второго человека.

Вероятность события *A* до того, как станет известно что-либо о событии *B*, равна $2/3$. Если стало известно, что событие *B* произошло, то вероятность события *A* становится равной $1/2$, из чего заключаем, что событие *A* зависит от события *B*.

Вероятность события *A*, вычисленная при условии, что имело место другое событие *B*, называется *условной вероятностью события A* и обозначается $P(A/B)$.

Для условий примера $P(A) = 2/3$, $P(A/B) = 1/2$.

Теорема умножения вероятностей формулируется следующим образом.

Вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место, т. е.

$$P(AB) = P(A)P(B/A).$$

$$P(AB) = P(A)P(B/A).$$

Очевидно, что при применении теоремы умножения безразлично, какое из событий — *A* или *B* — считать первым, а какое вторым, и теорему можно записать так:

Два события называют *независимыми*, если появление одного из них не изменяет вероятности появления другого.

Понятие независимых событий может быть распространено на случай произвольного числа событий. *Несколько событий* называют *независимыми*, если любое из них не зависит от любой совокупности остальных.

Вероятность произведения двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий. Теорема умножения вероятностей может быть обобщена на случай произвольного числа событий. В общем виде она формулируется так.

Вероятность произведения нескольких событий равна произведению вероятностей этих событий, причем вероятность каждого следующего по порядку события вычисляют при условии, что все предыдущие имели место:

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = P(A_1)P(A_2 / A_1)P(A_3 / A_1 A_2) \dots P(A_n / A_1 A_2 \dots A_{n-1}).$$

В случае независимых событий теорема упрощается и принимает вид:

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = P(A_1)P(A_2)P(A_3) \dots P(A_n),$$

т. е. вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий.

Следствием обеих основных теорем – теоремы сложения вероятностей и теоремы умножения вероятностей – является *формула полной вероятности*.

Пусть требуется определить вероятность некоторого события A , которое может произойти вместе с одним из событий: H_1, H_2, \dots, H_n , образующих полную группу несовместных событий, называемых *гипотезами*.

Гипотезы H_1, H_2, \dots, H_n , образуют полную группу несовместных событий, поэтому событие A может появиться только в комбинации с какой-либо из этих гипотез, т. е.

$$A = H_1 A + H_2 A + \dots + H_n A,$$

Так как гипотезы H_1, H_2, \dots, H_n несовместны, то и комбинации $H_1 A, H_2 A, \dots, H_n A$ также несовместны. Применяя теорему сложения, получим для этих гипотез:

$$P(A) = P(H_1 A) + P(H_2 A) + \dots + P(H_n A) = \sum_i P(H_i A).$$

Применяя к событию $H_i A$ теорему умножения, получим формулу *полной вероятности*.

$$P(A) = \sum_i P(H_i)P(A / H_i),$$

т. е. вероятность события A вычисляется как сумма произведений вероятности каждой гипотезы на вероятность события при этой гипотезе.

Пример. По движущемуся танку производят три выстрела из артиллерийского орудия. Вероятность попадания при первом выстреле равна 0,5; при втором - 0,7; при третьем - 0,8. Для вывода танка из строя заведомо достаточно трех попаданий. При одном попадании танк выходит из строя с вероятностью 0,3; при двух попаданиях - с вероятностью 0,9. Определить вероятность того, что в результате трех выстрелов танк выйдет из строя.

Р е ш е н и е. Рассмотрим четыре гипотезы: H_0 – в танк не попало ни одного снаряда. H_1 – в танк попал один снаряд, H_2 – в танк попало два снаряда и H_3 – в танк попало три снаряда.

Пользуясь теоремами сложения и умножения, найдем вероятности этих гипотез:

$$P(H_0) = 0,5 * 0,3 * 0,2 = 0,03;$$

$$P(H_1) = 0,5 * 0,3 * 0,2 + 0,5 * 0,7 * 0,2 + 0,5 * 0,3 * 0,8 = 0,22;$$

$$P(H_2) = 0,5 * 0,7 * 0,2 + 0,5 * 0,3 * 0,8 + 0,5 * 0,7 * 0,8 = 0,47;$$

$$P(H_3) = 0,5 * 0,7 * 0,8 = 0,28.$$

Условные вероятности события A (выход из строя танка) при этих гипотезах равны:

$$P(A/H_0) = 0; P(A/H_1) = 0,3; P(A/H_2) = 0,9; P(A/H_3) = 1,0.$$

Применяя формулу полной вероятности, получим

$$P(A) = P(H_0)P(A/H_0) + P(H_1)P(A/H_1) + P(H_2)P(A/H_2) + P(H_3)P(A/H_3) = 0,03 * 0 + 0,22 * 0,3 + 0,47 * 0,9 + 0,28 * 1,0 = 0,769.$$

В практике применения теории вероятностей часто приходится встречаться с задачами, в которых один и тот же опыт или аналогичные опыты повторяются многократно. В результате каждого опыта может появиться или не появиться некоторое событие A , причем нас интересует не результат каждого отдельного опыта, а общее число появлений события A в результате серии опытов. Например, если производится группа выстрелов по одной и той же цели, то нас интересует не результат каждого выстрела, а общее число попаданий.

Если проводят m независимых опытов, в каждом из которых событие A появляется с вероятностью P , то вероятность того, что событие появится ровно n раз в m опытах, выражается формулой Бернулли

$$P^n = C_m^n P^n (1 - P)^{m-n},$$

где C_m^n – число сочетаний из m по n .

$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!}.$$

3. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

При анализе факторов, влияющих на надежность, выявлено, что надежность объектов закладывается при проектировании и конструировании, реализуется при изготовлении и снижается при эксплуатации. Поэтому естественным является рассмотрение методов повышения надежности на этих трех этапах жизненного цикла АС.

Напомним, что надежность является комплексным, сложным свойством, состоящим в общем случае из безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Следовательно, и методы повышения надежности должны рассматриваться с позиции повышения этих четырех составляющих надежность свойств.

3.1. Классификация методов повышения надежности

Все способы повышения надежности КТС принципиально основываются на следующих методах:

- резервирование;
- уменьшение интенсивности отказов элементов системы;
- сокращение времени непрерывной работы системы;
- уменьшение времени восстановления элементов системы;
- выбор рациональной периодичности и объема контроля, диагностики и обслуживания систем.

Реализация указанных методов может осуществляться при проектировании и конструировании, изготовлении и в процессе эксплуатации оборудования.

Очевидно, что надежность систем в основном закладывается при проектировании, конструировании и изготовлении. От работы проектировщика и конструктора, в первую очередь, зависит, как будет работать оборудование в тех или иных условиях эксплуатации. Из этого вовсе не следует, что организация процесса эксплуатации не влияет на надежность объекта. При эксплуатации обслуживающий персонал может существенным образом изменить надежность системы, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

В процессе проектирования и конструирования используются *схемные и конструктивные способы* повышения надежности систем.

Схемные способы включают в себя:

- создание схем с минимально необходимым числом элементов;
- применение резервирования элементов;
- разработку схем, не допускающих последствий отказов элементов;
- оптимизацию последовательности работы элементов схемы;
- предварительный расчет надежности проектируемой схемы.

Уменьшение числа элементов при прочих равных условиях приводит к увеличению вероятности безотказной работы системы, а также благоприятно сказывается на ее массе, габаритах и стоимости. Однако при этом необходимо помнить, что сокращение числа элементов не должно увеличивать коэффициент нагрузки у оставшихся элементов, в противном случае эффект может быть прямо противоположным.

При создании схем с ограниченным последствием отказов применяется включение в схемы специальных защитных и предохранительных устройств, которые предотвращают аварийные последствия отказов.

Под оптимизацией последовательности работы элементов схемы понимается согласование тактов автоматической работы схем не только по времени, но и по достижении тем или иным параметром заданного значения.

В число *конструктивных способов* повышения надежности входит:

- использование элементов с малой величиной интенсивности отказов при заданных условиях эксплуатации;
- обеспечение благоприятного режима работы элементов;
- рациональный выбор совокупности контрольных параметров;
- рациональный выбор допусков на изменение основных параметров элементов и систем;
- защита элементов от вибраций и ударов;
- унификация элементов и систем;
- разработка эксплуатационной документации с учетом опыта применения системы, подобной конструируемой;
- обеспечение эксплуатационной технологичности конструкции (применение встроенных контрольных устройств, автоматизация контроля и индикация неисправностей, удобство подходов для обслуживания и ремонта).

Среди способов повышения надежности при производстве основными являются следующие:

- совершенствование технологии и организации производства, его автоматизация;
- применение инструментальных методов контроля качества продукции при статистически обоснованных выборках;
- тренировка элементов и систем.

Перечисленные способы повышения надежности должны применяться в совокупности с учетом влияния каждого из них на работоспособность системы. В тех случаях, когда меры противоречивы, нужно принимать компромиссное решение.

Способы повышения надежности систем, применяемые в эксплуатации, могут быть разбиты на две группы. В первую группу входят все изложенные методы. На основе изучения опыта эксплуатации инженер-эксплуатационник имеет возможность разработать ряд рекомендаций для проектировщиков и конструкторов, направленных на улучшение качества систем (изменение схемы, замена элементов, изменение конструкции, материалов и т.п.). Эти рекомендации согласовываются с конструкторами и вводятся специальными указаниями (доработками).

Однако нельзя считать, что в эксплуатации только устраняются ошибки конструктора и производства, хотя доля таких ошибок еще велика.

Вторая группа мероприятий, повышающих качество систем при эксплуатации, относится к воздействию обслуживающего персонала. К этим мероприятиям относятся:

- повышение квалификации обслуживающего персонала;
- применение инструментальных методов контроля технического состояния систем;
- обоснование объема и сроков проведения профилактических мероприятий, основанных на применении методов теории надежности;
- обоснование сроков службы элементов и состава запасных резервов;
- разработка и внедрение способов прогнозирования неисправностей.

Ряд мероприятий по повышению надежности систем относится к категории организационных, например:

- постановка широких экспериментальных исследований надежности объектов на всех этапах их разработки, изготовления и эксплуатации;
- создание единой системы информации о работоспособности объектов;
- обоснование, выбор и включение в ТЗ норм надежности;
- организация доработок и рекламационная практика.

Очевидно, что приведенный перечень путей по повышению надежности объектов представляет собой весьма широкий комплекс мероприятий, в том числе требующих проведения в государственном масштабе.

3.2. Резервирование

В настоящее время резервирование является одним из самых распространенных и наиболее эффективных способов повышения характеристик надежности систем.

В соответствии с ГОСТ Р 27.002-2009 «Надежность в технике. Термины и определения» *резервированием* называется применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов. При этом неисправный элемент заменяется исправным.

Резервирование непременно связано с введением *избыточности* – дополнительными средствами и возможности, сверхминимально необходимыми для обеспечения системы требуемым уровнем надежности. Задачей введения избыточности является обеспечение нормального функционирования объекта после возникновения отказа в его элементах.

Однако резервирование ведет к усложнению систем, увеличению их массы и стоимости. Поэтому перед конструктором стоит вопрос, каким образом зарезервировать систему, чтобы при допустимой массе, стоимости и габаритах получить максимальный выигрыш надежности.

При этом в настоящее время за критерий качества системы в смысле ее надежности принимается следующий: система считается абсолютно надежной, если отказ одного любого элемента не приводит к отказу всей системы. Реализация этого критерия на практике осуществляется путем поэлементного или поблочного резервирования.

Основные свойства резервирования:

1. Интенсивность отказов резервированной системы всегда начинается с нуля независимо от интенсивности отказов нерезервируемой системы. По мере увеличения времени эксплуатации системы, интенсивность отказов резервированной системы асимптотически стремится к интенсивности отказов нерезервированной системы. При *резервировании с дробной кратностью* интенсивность отказов резервированной системы при определенных значениях m и t может быть больше интенсивности отказов нерезервированной системы. Это означает, что система, у которой применено резервирование с дробной кратностью, может быть менее надежной, чем нерезервированная.

2. Выигрыш надежности по вероятности отказа тем больше, чем меньше интенсивность отказов нерезервированной системы, т.е. чем более надежная система резервируется. Это основное противоречие всякого резервирования. Оно приводит к тому, что для повышения надежности систем длительного использования необходима высокая кратность резервирования.

3. При схемной реализации любого резервирования, кроме *скользящего*, значительное увеличение массы системы приводит к менее значительному увеличению средней наработки до отказа.

3.3. Уменьшения интенсивности отказов элементов системы

Эффективными методами уменьшения интенсивности отказов элементов систем являются:

- применение наиболее надежных элементов;
- отбраковка («выжигание») малонадежных элементов системы;
- облегчение режимов работы элементов.

Выбор наиболее надежных элементов. При проектировании и конструировании систем недопустимо применение элементов с устаревшими характеристиками. Необходимо производить тщательный отбор даже среди рекомендованных типов элементов. С этой целью разрабатываются специальные нормы надежности элементов и систем.

В зависимости от назначения оборудования и количества входящих в системы элементов требуются различные уровни надежности элементов.

Кроме этого, при выборе элементов необходимо учитывать реальные условия эксплуатации системы. Значения интенсивностей отказов элементов, определенные в лабораторных (заводских) условиях, нуждаются в обязательной корректировке на действительные условия работы.

Отбраковка («выжигание») малонадежных элементов системы. Уменьшить интенсивность отказов можно путем отбраковки или «выжигания» элементов, имеющих конструктивные и производственные дефекты. Для этого осуществляется тщательная тренировка элементов системы в тяжелых условиях работы. Идея метода выжигания дефектных элементов состоит в исключении начального участка λ -характеристики (рисунок 3.1).

Численные значения КН времени выжигания определяются путем проведения специальных испытаний элементов при различных коэффициентах нагрузки и на основании статистических данных об отказах этих элементов.

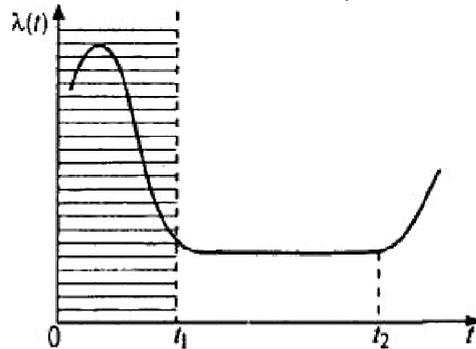


Рисунок 3.1 λ -характеристика с исключением периода приработки

Облегчение режимов работы элементов. Снижение нагрузки элементов, уменьшение их тепловых, вибрационных и других режимов приводит к уменьшению вероятности появления отказа. Поэтому облегчение режимов работы является одним из возможных путей повышения надежности оборудования. В подавляющем большинстве современных систем элементы работают в разгруженном режиме. Изменение интенсивности отказов в номинальном (кривая 1) и недогруженном (кривая 2) режимах работы элементов показано на рисунке 3.2.

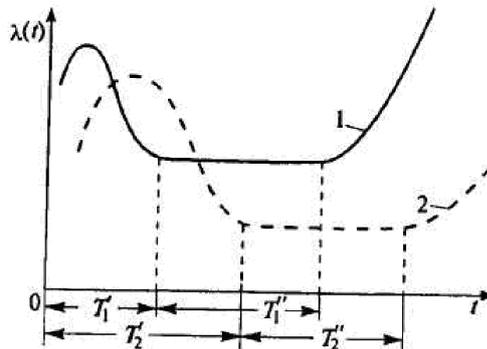


Рисунок 3.2 λ -характеристики систем с различной нагрузкой

Из рисунка видно, что при разгруженном режиме работы элементов интенсивность отказов в течение периода нормальной эксплуатации T_2' по-прежнему остается постоянной; ее величина уменьшается по сравнению с интенсивностью отказов при номинальном режиме работы, а длительности периодов приработки T_2 и нормальной эксплуатации увеличиваются.

3.4. Сокращение времени непрерывной работы и восстановления

При экспоненциальном распределении времени появления отказов значения λ и t входят в виде произведений. Это означает, что сокращение времени работы системы эквивалентно уменьшению интенсивности отказов. Поэтому, если при проектировании систем имеются возможности сокращения времени непрерывной работы, то с точки зрения повышения надежности указанные возможности необходимо реализовать.

Для подавляющего числа оборудования сложной системы весьма важным является такое их свойство, как готовность к действию. Готовность системы к выполнению своих функций, как известно, характеризуется *коэффициентом готовности*.

Уменьшение времени восстановления T_B при прочих равных условиях позволяет увеличить вероятность исправного состояния изделия в любой момент времени, т.е. повысить готовность системы.

Время восстановления T_B работоспособности объекта после отказа зависит от множества факторов. Уменьшение каждой из составляющих времени восстановления достигается широким комплексом мероприятий, применяемых как в процессе создания системы, так и при ее эксплуатации.

Мероприятия по улучшению восстанавливаемости систем на этапе их создания в основном сводятся к следующим:

- автоматизация процесса обнаружения неисправностей;
- автоматизация контроля основных параметров и режимов работы системы;
- резервирование;
- рациональное конструирование (блочная конструкция, доступность и удобство монтажа и т. п.);
- разработка рациональной эксплуатационной документации.

Эти факторы влияют на следующие показатели:

- среднее время пребывания объекта в ожидании ремонта и его проведения;
- среднее время доставки запасных элементов;
- среднее время удовлетворения рекламаций;
- потребное количество запасных элементов, которое необходимо иметь в запасном резерве e и др.

Усилия обслуживающего персонала должны быть направлены на проведение наиболее эффективных мероприятий по повышению восстанавливаемости систем, основными из которых являются:

- повышение квалификации обслуживающего персонала и приобретение ими устойчивых навыков поиска и замены отказавших элементов;
- обоснование рациональной периодичности и объема профилактических мероприятий;
- определение оптимального состава запасного резерва;
- обоснование и разработка оперативной системы снабжения;
- совершенствование методов эксплуатации и систем учета и отчетности;
- усовершенствование эксплуатационной документации.

3.5. Выбор рациональной периодичности и объема контроля и обслуживания систем

Поддержание требуемого уровня надежности элементов и систем – это одна из основных задач по обеспечению высокой безопасности и живучести

сложных систем. Среди мероприятий по повышению надежности при эксплуатации оборудования сложных систем важное место отводится техническому обслуживанию.

Под *техническим обслуживанием* (ТО) понимается комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на предупреждение отказов. К основным задачам ТО относятся предупреждение ускоренного износа, коррозии и старения; поддержание основных технических характеристик оборудования на заданном уровне; продление межремонтных сроков эксплуатации оборудования.

Основу ТО составляют *профилактические работы* и *регламентные проверки*. Профилактические работы (профилактика) проводятся периодически с целью выявления ненадежных, отказавших или неисправных элементов, а также для установления причин, способствующих возникновению отказов.

Планирование профилактики зависит от того, насколько вероятны ожидаемые отказы различной природы. Если отказы – редкие события и носят характер внезапных отказов, то не имеет смысла проводить частые плановые замены элементов системы, поскольку заменяемый элемент не будет менее надежен, чем новый, и замена его может привести не к повышению, а к снижению надежности. При постепенных отказах плановая замена элементов может существенно повысить надежность системы, если замена своевременна, – преждевременная замена экономически невыгодна, а запаздывание в замене не предупреждает отказа. Таким образом, разработка стратегии профилактических работ (выбор сроков, объема, последовательности, глубины и тщательности) зависит от характера потока отказов и восстановления, вида отказов, требований к надежности и экономической целесообразности.

Кроме безотказности на выбор длительности промежутка времени между циклами профилактических работ оказывают влияние следующие факторы: период эксплуатации и характер применения оборудования; долговечность элементов; стоимость; характер возможных последствий отказов.

Время профилактической проверки работоспособности оборудования назначается, исходя из следующих соображений:

1. При нормальном периоде эксплуатации, когда $\lambda(t) = \text{const}$ и известно значение допустимого снижения надежности, время профилактики t_{np} выбирается с учетом того, чтобы вероятность появления отказа не превышала допустимого значения Q_{don} :

$$Q(t) \leq Q_{don} = 1 - e^{-\lambda t}; \quad t_{np} \leq -\frac{\ln(1 - Q_{don})}{\lambda}.$$

2. Для определения времени календарного обслуживания оборудования, работающего длительно в непрерывном режиме и ориентированного на замену элементов, выработавших ресурс, предварительно оценивается средняя наработка до отказа T_{cp} и среднеквадратическое отклонение наработки $\sigma_{T_{cp}}(t)$ (рисунок 3.3).

Тогда: $t_{np} = T_{cp} - n\sigma_{T_{cp}}(t)$, где число n выбирается таким, чтобы вероятность отказа была меньше допустимой вероятности.

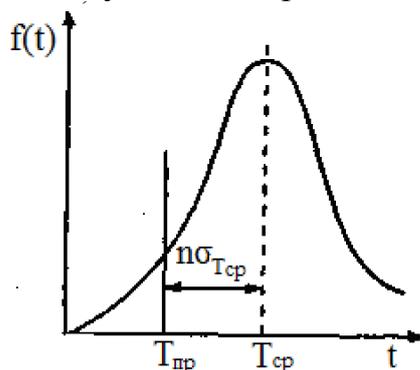


Рисунок 3.3 – Определение времени профилактических работ по f-характеристике

3. На λ -характеристиках оборудования в различные моменты времени могут появляться кратковременные повышения интенсивности «всплески», характеризующие различный ресурс элементов. Естественно, что в такие моменты целесообразно проведение профилактики соответствующего объема.

4 Для систем, работающих в дежурном режиме (системы управления и защиты, системы безопасности), весьма важно, чтобы профилактика не снижала обобщенный показатель надежности:

$$R = K_{ТИ} P(t),$$

где $K_{ТИ}$ – коэффициент технического использования.

5. Работы по техническому обслуживанию сложных систем в процессе эксплуатации можно осуществлять в зависимости от фактического состояния системы. Организация такого ТО получила название эксплуатации по состоянию. При эксплуатации оборудования по состоянию используется более глубокая информация о техническом состоянии системы, чем при календарном ТО, при котором в основу эксплуатации системы закладывается информация только о моментах отказов системы.

3.6. Классификация методов резервирования систем

Достигнутый в настоящее время уровень надежности элементной базы электроники, радиотехники, механических элементов, электротехники характеризуется значениями интенсивности отказов $\lambda = 10^{-6} \dots 10^{-7}$ 1/ч. В ближайшем будущем следует ожидать повышения этого уровня до $\lambda = 10^{-8}$ 1/ч. Это даст возможность поднять наработку на отказ системы, состоящей из $N = 10^6$ элементов, до значения 100 ч, что явно недостаточно. Необходимая надежность сложных систем может быть достигнута только при использовании различных видов резервирования.

Существуют разнообразные методы резервирования. Их целесообразно разделять по следующим признакам (рис. 3.4): вид резервирования, способ соединения элементов, кратность резервирования, способ включения резерва, режим работы резерва, восстанавливаемость резерва.

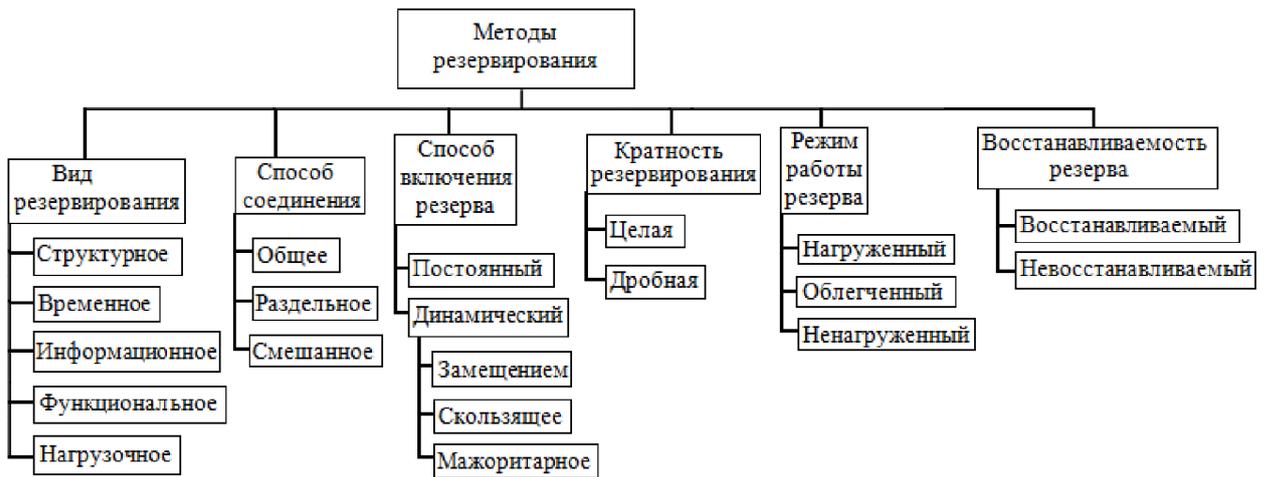


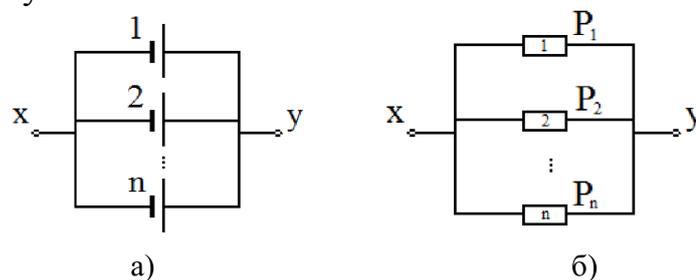
Рис. 3.4 – Классификация методов резервирования систем

Структурное резервирование, иногда называемое аппаратным (элементным, схемным), предусматривает применение резервных элементов структуры объекта. Суть структурного резервирования заключается в том, что в минимально необходимый вариант объекта вводятся дополнительные элементы. Элементы резервированной системы носят следующие названия.

Основной элемент – элемент структуры объекта, необходимый для выполнения объектом требуемых функций при отсутствии отказов его элементов. *Резервный элемент* – элемент объекта, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего.

Определение основного элемента не связано с понятием минимальности основной структуры объекта, поскольку элемент, являющийся основным в одних режимах эксплуатации, может служить резервным в других условиях. Резервируемый элемент – основной элемент, на случай отказа, которого в объекте предусмотрен резервный элемент.

На рис. 3.5 приведена схема соединения основных и резервных элементов, так называемым параллельным соединением элементов. Системой с параллельным соединением элементов называется такая система, которая отказывает только в случае отказа всех ее элементов.



а – принципиальная схема, б – расчетная схема

Рис. 3.5 – Пример параллельного соединения элементов

Временное резервирование связано с использованием резервов времени. При этом предполагается, что на выполнение объектом необходимой работы отводится время, заведомо большее минимально необходимого. Резервы времени могут создаваться за счет повышения производительности объекта, инерционности его элементов и т.д.

Информационное резервирование – это резервирование с применением избыточности информации. Примерами информационного резервирования являются многократная передача одного и того же сообщения по каналу связи; применение при передаче информации по каналам связи различных кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки, которые появляются в результате отказов аппаратуры и влияния помех; введение избыточных информационных символов при обработке, передаче и отображении информации. Избыток информации позволяет в той или иной мере компенсировать искажения передаваемой информации или устранять их.

Функциональное резервирование – резервирование, при котором заданная функция может выполняться различными способами и техническими средствами. Например, функция передачи информации в АСУ может выполняться с использованием радиоканалов, телеграфа, телефона и других средств связи. Поэтому обычные усредненные показатели надежности (средняя наработка на отказ, вероятность безотказной работы и т.п.) становятся малоинформативными и недостаточно пригодными для использования в данном случае. Наиболее подходящие показатели для оценки функциональной надежности: вероятность выполнения данной функции, среднее время выполнения функции, коэффициент готовности для выполнения данной функции.

Нагрузочное резервирование – это резервирование с применением нагрузочных резервов. Нагрузочное резервирование, прежде всего, заключается в обеспечении оптимальных запасов способности элементов выдерживать действующие на них нагрузки. При других способах нагрузочного резервирования возможно введение дополнительных защитных или разгружающих элементов.

Перечисленные виды резервирования могут быть применены либо к системе в целом, либо к отдельным элементам системы или к их группам. В первом случае резервирование называется общим, во втором – раздельным. Сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте называется *смешанным*.

По способу включения резервных элементов различают постоянное, динамическое, резервирование замещением, скользящее и мажоритарное резервирование.

Постоянное резервирование – это резервирование без перестройки структуры объекта при возникновении отказа его элемента. В случае отказа основного элемента не требуется специальных устройств, вводящих в действие резервный элемент, а также отсутствует перерыв в работе (рис. 3.6 – 3.8). Постоянное резервирование в простейшем случае представляет собой параллельное соединение элементов без переключающих устройств.

Динамическое резервирование – это резервирование с перестройкой структуры объекта при возникновении отказа его элемента. Динамическое резервирование имеет ряд разновидностей.

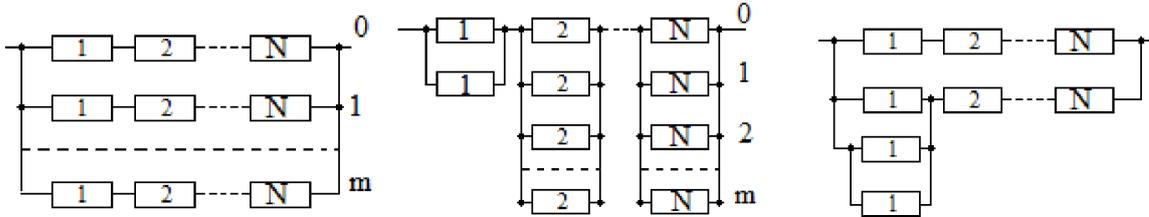


Рис. 3.6. Общее резервирование с постоянно включенным резервом

Рис. 3.7. Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом

Рис. 3.8. Смешанное резервирование с постоянно включенным резервом

Резервирование замещением – это динамическое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента. Включение резерва замещением (рис. 3.9, 3.10) обладает следующими преимуществами:

- не нарушает режима работы резерва;
- сохраняет в большей степени надежность резервных элементов, так как при работе основных элементов они находятся в нерабочем состоянии;
- позволяет использовать резервный элемент на несколько основных элементов.

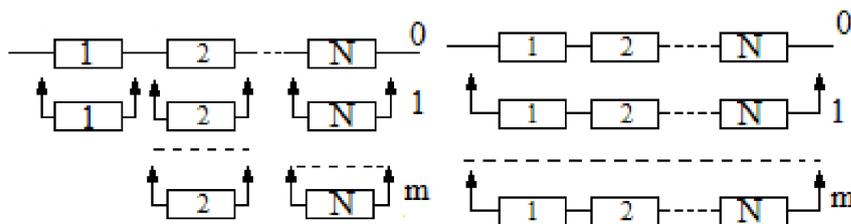


Рис. 3.9. Общее резервирование с включением резерва замещением

Рис. 3.10. Раздельное резервирование с включением резерва замещением

Существенным недостатком резервирования замещением является необходимость наличия переключающих устройств. При раздельном резервировании число переключающих устройств равно числу основных элементов, что может сильно понизить надежность всей системы. Поэтому резервировать замещением выгодно крупные узлы или всю систему, а во всех других случаях – при высокой надежности переключающих устройств.

Скользящее резервирование – это резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе (рис. 3.11).

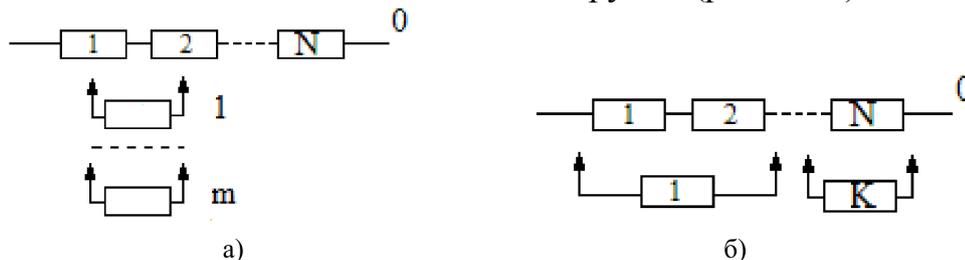


Рис. 3.11. Скользящее резервирование с однотипными а) и неоднотипными б) элементами

В системах управления нашло широкое применение *мажоритарное резервирование*. Этот способ основан на применении дополнительного элемента, называемого мажоритарным или логическим элементом. Логический элемент позволяет вести сравнение сигналов, поступающих от элементов, выполняющих одну и ту же функцию. Если результаты совпадают, то они считаются исправно работающими и их сигналы считаются истинными и проходят на выход устройства.

На рис. 3.12 изображено резервирование по принципу «2 из 3», т.е. любые два совпадающих результата из трех считаются истинными и проходят на выход устройства. По такому принципу построены многие схемы подсистем систем управления и защиты (СУЗ). Можно применять соотношения «3 из 5» и др. Главное достоинство этого метода – обеспечение повышения надежности при любых видах отказов элементов и повышение достоверности информационно-логических объектов.

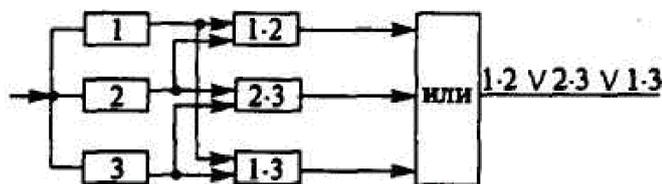


Рис. 3.12. Мажоритарное резервирование

Степень избыточности характеризуется *кратностью резервирования*.

Кратность резерва – это отношение числа резервных элементов объекта к числу резервируемых основных элементов, выраженное несокращенной дробью. Резервирование с целой кратностью имеет место, когда один основной элемент резервируется одним или более резервными элементами.

Резервирование с дробной кратностью – это такое резервирование, когда два и более однотипных элементов резервируются одним и более резервными элементами (рис. 3.13). Наиболее распространенным вариантом резервирования с дробной кратностью является такой, когда число основных элементов превышает число резервных. Резервирование, кратность которого равна единице, называется *дублированием*.

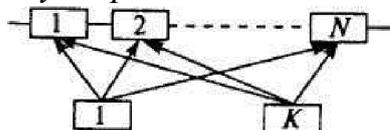


Рис. 3.13. Резервирование с дробной кратностью при нагруженном резерве

В зависимости от режима работы резерва различают нагруженный, облегченный и ненагруженный резервы.

Нагруженный резерв (горячий резерв) – это резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента. При этом принимается, что элементы нагруженного резерва имеют тот же уровень безотказности, долговечности и сохраняемости, что и резервируемые ими основные элементы объекта.

Облегченный резерв (теплый резерв) – это резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной. Элементы облегченного резерва обладают, как правило, более высоким уровнем безотказности, долговечности и сохраняемости, чем основные элементы.

Ненагруженный резерв (холодный резерв) – это резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента. Для элементов ненагруженного резерва условно полагают, что они никогда не отказывают и не достигают предельного состояния.

Резервирование, при котором работоспособность любого одного или нескольких резервных элементов в случае возникновения отказов подлежит восстановлению при эксплуатации, называется *резервированием с восстановлением*, в противном случае имеет место *резервирование без восстановления*. Восстанавливаемость резерва обеспечивается при наличии контроля работоспособности элементов. При наличии резервирования это особенно важно, так как в этом случае число скрытых отказов может быть больше, чем при отсутствии резервирования. В идеальном варианте отказ любого элемента объекта обнаруживается без задержки, а отказавший элемент незамедлительно заменяется или ремонтируется.

4. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

4.1. Структурная надежность. Расчет надежности

Системы, состоящие из подсистем, которые могут быть выделены по функциональным и пространственным признакам, имеют структуру. Если система состоит из подсистем $e_1, e_2, e_i, \dots, e_n$, которые называют элементами, то она также как и элементы может находиться либо в работоспособном состоянии, либо в состоянии отказа.

Структурная надежность – это результирующая надежность системы при заданной структуре и известных значениях надежности всех входящих в нее блоков или элементов.

Для расчета надежности системы используются структурные схемы – *модели надежности систем*, представляющие собой ненаправленный граф с входной и выходной вершинами, каждый элемент которого соответствует одному элементу системы.

Модель надежности системы строится на основе анализа влияния определенного вида отказов элементов на надежность системы в целом. Чаще всего структурная схема системы, построенная для решения задач надежности, не совпадает с функциональной схемой системы или конструктивной схемой соединения ее элементов (*электрические автоматы-выключатели*).

Состояние системы однозначно определяется состоянием её элементов и зависит от её структуры. С точки зрения надежности различают *последовательные, параллельные и системы со сложной структурой*.

Расчёт надежности при последовательном (основном) соединении элементов

При таком соединении отказ технического изделия наступает при отказе одного из его узлов. Т.е. работоспособность основной системы обеспечивается при условии, когда все N элементов системы находятся в работоспособном состоянии. Например, контур АСР температуры, состоящий из датчика температуры ТЕ, контролера ТИС и регулирующего клапана (103-3).

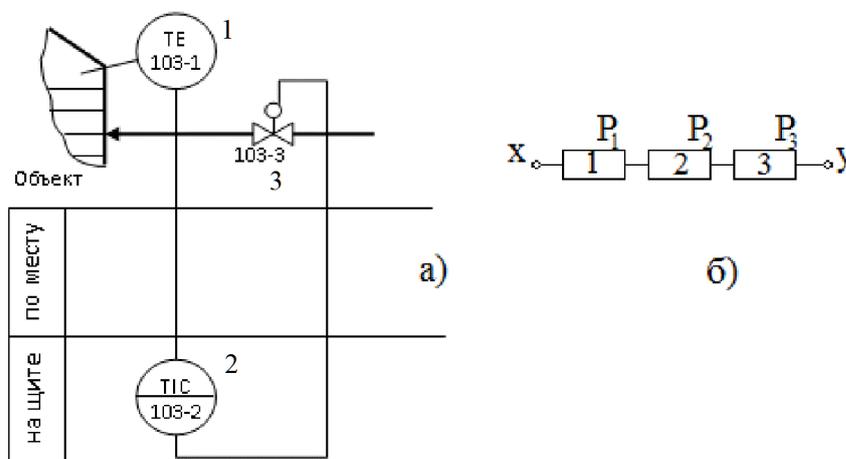


Рисунок 4.1 – Пример последовательного соединения элементов:
а) – схема автоматизации; б) – модель надежности

Поскольку события, заключающиеся в работоспособности элементов системы, являются независимыми, то случайная наработка последовательной системы, состоящей из N элементов

$$T_{0c} = \min\{T_{01}, T_{02}, T_{0i}, \dots, T_{0N}\}.$$

где T_{0i} – наработки элементов системы.

Отсюда согласно теореме умножения вероятностей

$$P(T_{0c} > t) = P(T_{01} > t, \dots, T_{0N} > t) = P(T_{01} > t) \cdot \dots \cdot P(T_{0N} > t).$$

P_1, \dots, P_i – надежность отдельных элементов системы.

Тогда ВБР всей системы:

$$P_c(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_N(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t).$$

Интенсивность отказов последовательной системы равна сумме интенсивностей отказов её элементов:

$$\lambda_c(t) = \lambda_1(t) + \dots + \lambda_N(t).$$

При **экспоненциальном распределении** наработки до отказа для каждого из элементов (отказы только внезапные):

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t}; \quad T_{0c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_c t} dt = \frac{1}{\lambda_c}.$$

Таким образом, при экспоненциальной наработке до отказа каждого из n элементов, распределение наработки до отказа системы также подчиняется экспоненциальному распределению.

Для последовательного соединения элементов надежность системы меньше надежности каждого из элементов. С увеличением числа элементов надежность системы уменьшается. Например, при $N = 1000$; $P_i(t) = 0,99$; $P_c(t) < 10^{-4}$ и средняя наработка до отказа системы в 1000 раз меньше средней наработки каждого из элементов.

Расчёт надежности при нагруженном резервировании элементов

Рассматривается система, состоящая из одного основного и $(N - 1)$ резервных элементов. При условии, что отказы элементов независимы, отказ системы происходит только при отказе всех N элементов. Т.е. система работоспособна, пока работоспособен хотя бы один элемент или существует, по крайней мере, один путь от входного сигнала к выходному.

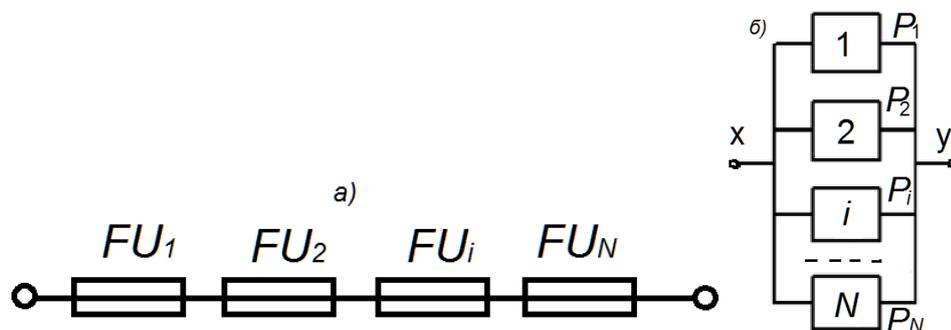


Рисунок 4.2 – Пример параллельного соединения элементов:
а) – схема монтажная предохранителей; б) – модель надежности

Случайная наработка нагружено резервированной системы, состоящей из N независимых элементов равна

$$T_{0c} = \max \{T_{01}, T_{02}, T_{0i}, \dots, T_{0N}\}.$$

где T_{0i} – наработки элементов системы.

Отсюда согласно теореме умножения вероятностей

$$P(T_{0c} > t) = 1 - P(T_{0c} \leq t) = 1 - P(T_{01} \leq t, \dots, T_{0N} \leq t) = 1 - P(T_{01} \leq t) \dots P(T_{0N} \leq t)$$

а вероятность отказа нагружено резервированной системы, состоящей из N независимых элементов, равна произведению вероятностей всех элементов

$$Q_c(t) = Q_1(t)Q_2(t)\dots Q_N(t) = \prod_{i=1}^N Q_i(t).$$

Тогда ВБР всей системы:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^N Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i(t)).$$

При **экспоненциальном распределении** наработки до отказа для каждого из равнонадежных элементов (отказы только внезапные)

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^N.$$

Функция плотности распределения ВБР системы:

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = \lambda N e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{N-1}.$$

Интенсивность отказов системы:

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{\lambda N e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{N-1}}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^N}.$$

Из выражения видно, что при $t = 0$ $\lambda_c(t) = 0$ и с увеличением времени растёт, достигая при $t \rightarrow \infty$ интенсивности отказов одного элемента λ .

Среднее время безотказной работы нагружено резервированной системы

$$T_{0c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - (1 - e^{-\lambda t})^N) dt = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^N \frac{1}{k} = T_0 \sum_{k=1}^N \frac{1}{k}.$$

Из выражения видно, что увеличение кратности резервирования приводит к менее значительному увеличению средней наработки до отказа системы.

Расчёт надёжности при кратном резервировании элементов

При резервировании с дробной кратностью нормальная работа резервированного соединения возможна при условии, если число исправных элементов не меньше необходимого для нормальной работы. Кратность резервирования определяется из соотношения

$$m = \frac{Z - N}{N} = \frac{K}{N},$$

где Z – общее число элементов расчёта резервированного соединения; N – число основных элементов, необходимое для нормальной работы соединения; $(Z - N) = K$ – число резервных элементов.

Пусть резервированная система состоит из N основных и K резервных элементов ($N > K$). При отказе одного из основных элементов, на его место без перерыва в работе включается один из резервных (резервные элементы также могут отказывать). Таких замещений, не нарушающих работу резервированной системы в целом, не может быть больше K . Средняя наработка до отказа такой резервированной системы в предположении абсолютно надежных переключающих устройств и равнонадежных элементов с интенсивностью отказов каждого λ равна

$$T_{0c} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{N} + \frac{1}{N+1} + \dots + \frac{1}{N-K} \right) \text{ при } (N > K).$$

Безотказная работа системы в течение времени t будет иметь место, если за это время осуществится хотя бы одна из гипотез: H_0 — все элементы исправны; H_1 — один элемент отказал, $(K + N - 1)$ элементов исправны; $(H_i - i)$ элементов отказали, $(K + N - i)$ элементов исправны; $(H_k - K)$ элементов отказали, N элементов исправны. Число различных вариантов равно

$$C_{N+K}^i = \frac{(N+K)!}{i!(K+N-i)!}.$$

Тогда ВБР системы можно определить из выражения

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^K C_{N+K}^i [1 - P(t)]^i [P(t)]^{N+K-i},$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы элемента при условии, что все элементы равнонадежны. Для мажоритарного резервирования по схеме «2 из 3» вероятность безотказной работы системы можно подсчитать по формуле

$$P_c(t) = P_M(t) [3P^2(t) - 2P^3(t)],$$

где $P(t)$ — ВБР одного канала (элемента, подсистемы); $P_M(t)$ — ВБР мажоритарного органа.

5. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

5.1. Основные понятия и определения

Процесс определения состояния объекта называют *диагностированием*. *Объектом диагностирования* (ОД) может быть блок, устройство, прибор, комплекс, состояние которого устанавливают. Часть объекта, которую при диагностировании нельзя разделить на более мелкие, считают *элементом*. Любой ОД состоит из элементов (в пределе из одного элемента). Результат диагностирования, т.е. заключение о состоянии технического объекта, называют *диагнозом*.

Состояние объекта оценивают по диагностическим показателям (параметрам или характеристикам), определяющим состояние объекта. Каждому состоянию соответствует свое значение диагностических показателей. Если объект может выполнить возложенные на него функции, его называют *работоспособным*, а состояние (состояния) — *работоспособным состоянием*. При изменении диагностического показателя недопустимым образом говорят, что в объекте возник дефект. В объекте, состоящем из нескольких элементов, дефектом будет и нарушение связи или появление лишней связи между элементами. Возникновение дефекта в объекте, состоящем из одного элемента, соответствует потере работоспособности. Дефект в объекте из нескольких элементов не обязательно приводит к потере его работоспособности.

Таким образом, можно говорить о дефектах, приводящих к потере работоспособности, и дефектах, не приводящих к потере работоспособности. При наличии дефекта объект сохраняет работоспособность или за счет избыточности (структурной, временной, информационной), или за счет того, что потеря работоспособности не всех элементов не приводит к потере работоспособности объекта. В тех случаях, когда в объекте возник дефект, но работоспособность не потеряна, говорят, что *степень работоспособности* объекта снизилась, а следовательно, повысилась вероятность его отказа в дальнейшем.

Процесс установления состояния объекта предусматривает наличие обоснованной программы и заданных алгоритмов диагностирования.

Алгоритм диагностирования представляет собой совокупность предписаний о выполнении определенных действий в процессе диагностирования. *Программа диагностирования* состоит из множества алгоритмов, объединяемых единой целью оценки состояния технического объекта. В принципе, в процессе диагностирования в зависимости от условий его выполнения и особенностей технического объекта решают следующие задачи:

- 1) определяют, может ли технический объект по своему состоянию выполнять возложенные на него функции;
- 2) определяют характер дефекта, возникшего в объекте;
- 3) предсказывают момент времени, когда диагностические показатели достигнут определенного значения или когда объект потеряет работоспособность.

Первую из задач — *определение работоспособности объекта*, — как правило, обязательно решают при диагностировании объектов любого назначения. Если объект утратил работоспособность или работоспособность его значительно снизилась, в процессе диагностирования решают вторую задачу — *поиск возникшего дефекта*. Целесообразность решения этой задачи определяется возможностью восстановления объекта, т. е. устранения возникшего дефекта. В свою очередь, устранить возникший дефект можно только тогда, когда объект *ремонтпригоден*, т. е. приспособлен к устранению возникающих в нем дефектов, и обслуживающий персонал имеет средства и время для восстановления объекта. Поиск дефекта начинают, как правило, если известно его наличие, но неизвестно, какой именно дефект возник. Однако бывает ситуация, когда осуществляют поиск возможного дефекта, и такую задачу называют *проверкой исправности объекта*. Решение этой задачи характерно для диагностирования объекта в процессе производства.

Третью задачу называют *прогнозированием изменения состояния объекта*. При ее решении изучают характер изменения диагностических показателей под влиянием внешних и внутренних воздействий и на основе сформировавшихся тенденций предсказывают значения показателей в определенный момент времени.

Наиболее распространены следующие сочетания задач, решаемых в процессе диагностирования: определение работоспособности (степени работоспособности) и поиск возникшего дефекта; определение работоспособности (степени работоспособности) и прогнозирование изменения состояния; определение работоспособности, поиск возникшего дефекта и прогнозирование изменения состояния.

Первое сочетание возможно тогда, когда диагностируют восстанавливаемый объект. В этом случае на основе полученного диагноза обслуживающий персонал восстанавливает работоспособность объекта. Второе сочетание соответствует случаю невозстанавливаемого объекта, когда обслуживающий персонал, учитывая диагноз, принимает решение об использовании или режиме использования объекта. Третье сочетание, когда при диагностировании решают все три основные задачи диагностирования, характерно для восстанавливаемого объекта при необходимости установления срока безотказного его функционирования. Такое положение типично для диагностирования высокосложных и особо ответственных объектов.

Процесс формирования технического диагноза (рис. 5.1) предусматривает следующие процедуры: при положительном результате определения работоспособности *ОР* объекта — выдачу заключения о работоспособности объекта; определение степени работоспособности *ОСР* объекта и выдачу заключения о состоянии объекта; прогнозирование изменения состояния *ПИС* объекта и выдачу заключения о состоянии объекта; при отрицательном результате проверки работоспособности объекта — выдачу заключения о неработоспособности объекта; поиск возникшего дефекта *ПД* и выдачу заключения о состоянии объекта.

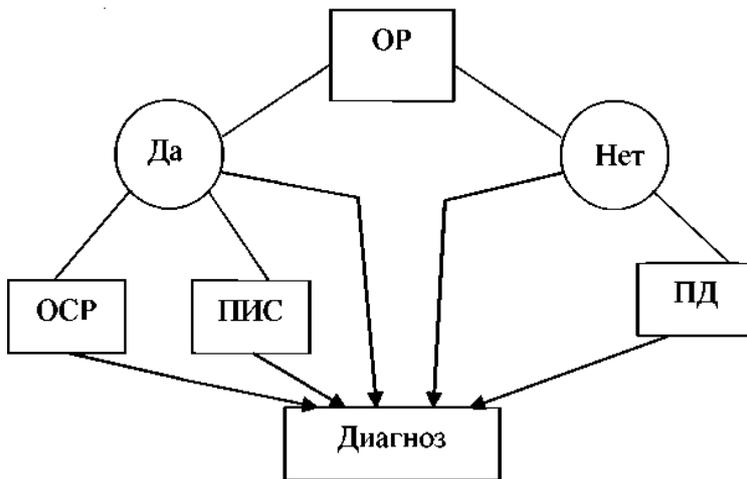


Рис. 5.1 Процесс формирования диагноза

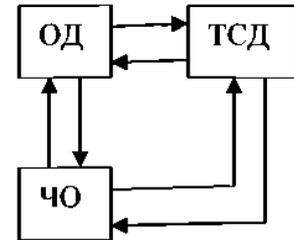


Рис. 5.2 Структурная схема системы диагностирования

Методология технической диагностики основана на следующих исходных положениях.

Первое положение — допущение о том, что технический объект может находиться в конечном множестве состояний S .

Состояние технических объектов под воздействием внешних факторов и вследствие внутренних необратимых процессов изменяется непрерывно, однако из-за ограниченных возможностей контрольных и измерительных средств на практике фиксируют ограниченное множество состояний S . В множестве S выделяют два непересекающихся подмножества S_1 и S_2 : S_1 — подмножество работоспособных состояний, S_2 — подмножество неработоспособных состояний.

Подмножество $S_1 = \{s_i\}$, $i = 1, \dots, n$ включает все состояния, которые позволяют объекту выполнить возложенные на него функции или решить поставленные перед ним задачи. Каждое состояние в этом подмножестве различается степенью или запасом работоспособности, которые характеризуются приближением состояния объекта к предельно допустимому. Оценивают состояние, измеряя и контролируя параметры или характеристики.

Подмножество $S_2 = \{s_j\}$, $j = 1, \dots, m$ включает все состояния, соответствующие возникновению дефектов, приводящих к потере работоспособности объекта. Возможные отказы разделяют на отказы элементов, которые определяют как недопустимые количественные изменения какого-либо параметра (характеристики) вследствие необратимых физико-химических изменений, и отказы объекта, которые трактуются как недопустимые изменения параметров (характеристик) или изменения структурных связей в объекте. Мощность подмножества S_2 определяется количеством различных дефектов или глубиной поиска дефектов. Переход из одного состояния в другое зависит от возникновения в объекте дефекта.

Второе положение — решение задач оценки состояния технического объекта сводится к анализу множества S или подмножеств S_1 и S_2 .

При *определении работоспособности* осуществляют проверку условий работоспособности, по результатам которой состояние ОД относят к одному из подмножеств: S_1 или S_2 .

Условия работоспособности — это условия, в которых ОД может выполнить поставленные перед ним задачи или возложенные на него функции.

При поиске возникшего дефекта после установления, что объект неработоспособен, анализируют подмножество S_2 и устанавливают, какому именно подмножеству S_i соответствует текущее состояние объекта.

При *прогнозировании изменения состояния объекта* анализируют подмножество S_1 причем каждому состоянию s_i из S_1 соответствует вполне определенная степень работоспособности объекта.

Анализ состояний объекта в подмножестве S_1 позволяет установить характер изменения степени его работоспособности, в ряде случаев предсказать моменты перехода объекта в подмножество S_2 и, следовательно, прогнозировать состояние объекта. Успех прогнозирования во многом определяется изученностью условий эксплуатации и возможностью измерения параметров и характеристик, описывающих временные изменения состояния объекта.

Третье положение — в процессе диагностирования участвуют, как правило, ОД, технические средства диагностирования и человек-оператор (ЧО).

Техническими средствами диагностирования (ТСД) называют средства, предназначенные для определения состояния технической объектом.

Совокупность объекта, ТСД, а если требуется, и ЧО образует *систему диагностирования* (рис. 5.2).

Четвертое положение — возникновение в техническом объекте дефекта не означает, что объект неработоспособен. Возникновение дефекта приводит к тому, что объект из одного состояния s_k переходит в другое состояние s_l . Однако при этом условия работоспособности могут не нарушаться в том случае, когда s_k и s_l относятся к подмножеству S_1 состояний. Таким образом, работоспособный объект может иметь дефект так же, как и неработоспособный. Следовательно, заключение о том, что объект работоспособен, не означает, что в нем дефекты отсутствуют. С другой стороны, если объект неработоспособен, то в нем обязательно имеется дефект.

5.2. Характеристика методов диагностирования

Оценить состояние технического объекта можно, наблюдая за выполнением возложенных на него функций (функциональное диагностирование) или подавая на объект внешние воздействия и наблюдая за его реакцией (тестовое диагностирование).

Основное достоинство функционального диагностирования в том, что для его реализации не нужны специальные генераторы стимулирующих воздействий. Диагностирование заключается в обработке информации, характеризующей качество функционирования ОД, т.е. необходимо определить ее характер, выбрать точки в объекте для съема и момент съема информации.

На рисунке 5.3 показана классификация методов функционального ди-

агностирования. Функциональное диагностирование можно осуществлять по конечному результату, т.е. выходу объекта, причем выходную реакцию на рабочие воздействия оценивают одномерно или многомерно. Многомерность характерна для диагностирования дискретных объектов и оценки состояния объектов по диагностическим характеристикам; одномерность, как правило, – для оценки диагностических параметров. Технологическое оборудование и технологические процессы диагностируют по качеству продукции. При этом также возможны одномерные и многомерные оценки.



Рис. 5.3. Классификация методов функционального диагностирования

Функциональное диагностирование осуществляют также, наблюдая за результатом отдельной операции (выходом блока). При этом, как и в предыдущем случае, оценивают реакцию блока - структурной единицы (СЕ) на входное воздействие или результат операции (при производстве – качество промежуточного продукта). И в этом случае возможны одномерные и многомерные случаи.

Диагностирование осуществляют и по алгоритму функционирования объекта. В данном случае фиксируют только последовательность выполнения всех операций или только временные интервалы и продолжительность выполнения операций, или то и другое. Выбор метода определяют специфика объекта и особенности построения алгоритма функционирования.

Состояние объекта в процессе его функционирования оценивают по раз-

личным внешним признакам. В первую очередь, это сопутствующий нагрев отдельных деталей или вообще тепловое поле, создаваемое объектом при функционировании. Нагрев элементов объекта свыше допустимого говорит о возникновении в нем дефекта.

Для оценки состояния электротехнических и электронных объектов используют электромагнитное поле, создаваемое ими при функционировании. Искажение этого поля свидетельствует о том, что состояние объекта изменилось.

Большие возможности для оценки состояния объектов с подвижными элементами вращательного и поступательного движения имеют виброакустические методы. Анализ виброакустического поля объекта позволяет обнаружить ненормальности в его работе, вызванные изменением его состояния.

Для оценки состояния механических объектов в процессе их функционирования используют результаты анализа отработавших газов. Примером таких объектов служат судовые дизели. О состоянии объектов при функционировании судят и по различным косвенным признакам. Так, в объектах с трущимися деталями износ сопровождается увеличением концентрации металлических включений в смазочном масле. Фиксируя эти изменения, судят о степени износа трущихся деталей и, следовательно, об изменении состояния объекта.

Информацию о состоянии объекта дает расход топлива или потребление энергии. Как правило, увеличение потребления топлива (энергии) свидетельствует о нарушениях в работе объекта, которые могут быть вызваны возникновением дефекта.

Следует особо подчеркнуть, что при функциональном диагностировании на вход объекта должны поступать нормальные рабочие сигналы (воздействия) и ОД должен функционировать в нормальных условиях.

Выполнение тестового диагностирования требует специальных генераторов, которые вырабатывают тестовые воздействия, подаваемые в ОД и стимулирующие его реакцию. По степени отклонения реакции объекта от номинальной при тестовом воздействии судят о состоянии ОД. На рис. 5.4 приведена характеристика методов, тестового диагностирования. Тестовое диагностирование осуществляют как при функционировании объекта, так и в тех случаях, когда объект не выполняет своих рабочих функций. При тестовом диагностировании необходимо принять меры, исключающие влияние тестовых воздействий на правильность функционирования объекта. При тестовом диагностировании нефункционирующего объекта может потребоваться введение его в режим диагностирования (прогрев, включение и т. и.).

Для тестового диагностирования используют как рабочие входы (входы, предназначенные для введения рабочих воздействий), так и входы, специально организованные для диагностирования. Это положение справедливо и для съема информации о реакции объекта на тестовое воздействие при его диагностировании.

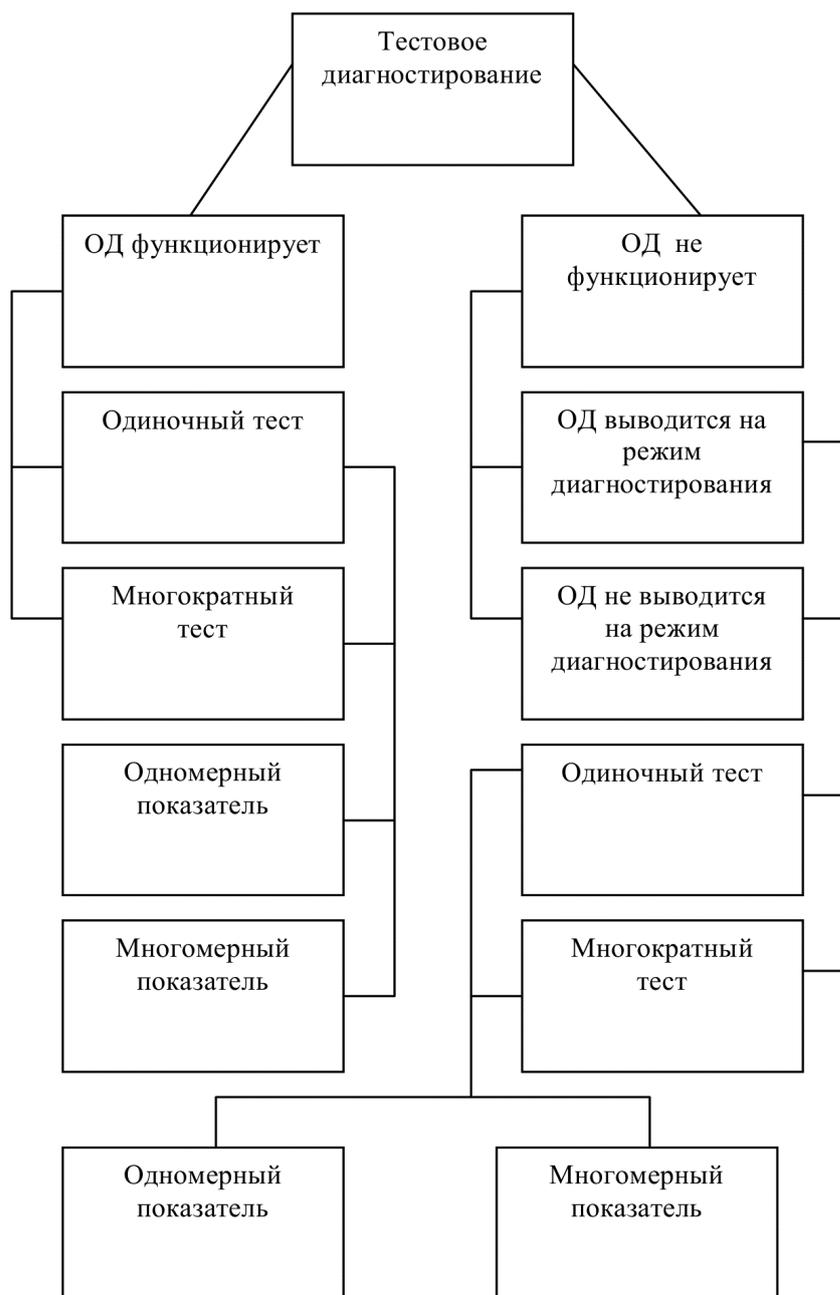


Рис. 5.4. Классификация методов тестового диагностирования

Тестовое диагностирование осуществляют одиночным воздействием, например одиночным импульсом (т.е. в результате одной элементарной проверки), или многократным воздействием (серией импульсов), т.е. в результате совокупности элементарных проверок. Многократное воздействие характерно для тестового диагностирования дискретных объектов, когда на вход подается серия (последовательность) импульсов. При тестовом диагностировании возможен одномерный случай, когда оценивают один показатель, или многомерный, когда оценивают более одного показателя. Многомерные случаи специфичны для дискретных объектов, когда на вход подают и с выхода снимают векторные величины. К многомерному сводится и случай, когда на выходе объекта оценивают один выходной сигнал по нескольким показателям (например, амплитуда и частота).

Для сложного объекта, состоящего из нескольких взаимосвязанных элементов, можно использовать сочетания разных методов при диагностировании различных элементов. При этом допустимо применение для одного объекта как функционального, так и тестового диагностирования.

5.3. Диагностирование в жизненном цикле системы диагностирования

Для любого технического объекта характерны следующие стадии жизненного цикла (рис. 5.5): проектирование, производство, эксплуатация и использование. При этом под эксплуатацией понимают комплекс мероприятий по обеспечению заданного уровня готовности, а под использованием — применение объекта по прямому назначению. Диагностирование связано со всеми стадиями жизненного цикла объекта.

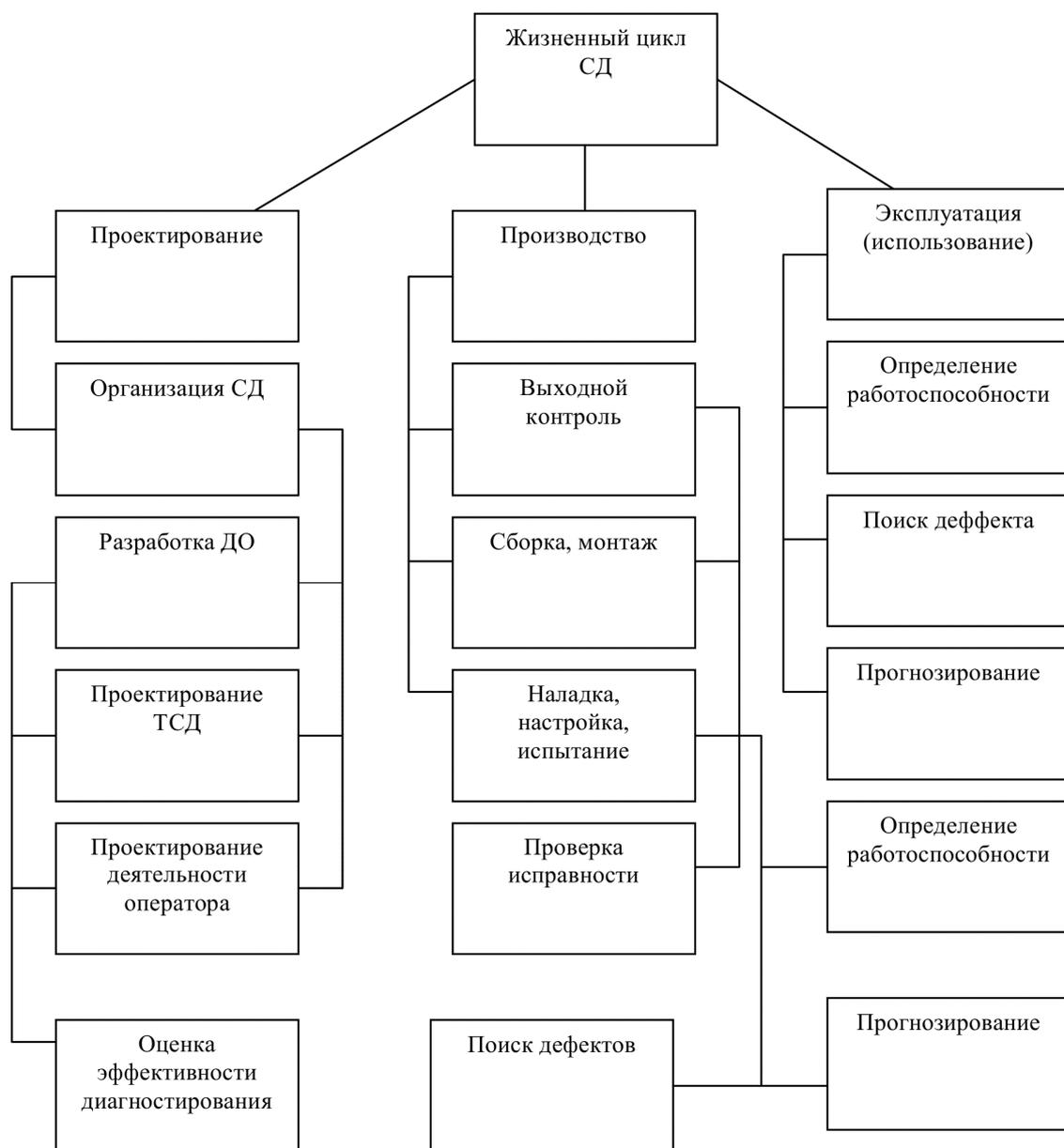


Рис. 5.5. Диагностирование в жизненном цикле технических объектов:
СД - система диагностирования, ДО - диагностическое обеспечение

Перед проектными организациями стоит задача разработки работоспособных объектов, а перед производственными — изготовление объектов, состояние которых входит в подмножество S_x . Соответственно эксплуатационники должны задерживать или возвращать состояние объектов в подмножество S_x . Для решения этих задач в период проектирования необходимо предусматривать оценку состояния разрабатываемого объекта, делая его контролепригодным, в процессе производства нужно оценивать состояние комплектующих элементов, добиваясь работоспособности изготавливаемого объекта, и, наконец, при эксплуатации требуется периодически оценивать состояние объекта для принятия решения о его использовании или восстановлении.

В процессе эксплуатации и использования объекта большую роль играет организация процесса диагностирования объекта и самоконтроля технических средств. В связи с этим на самом начальном этапе проектирования системы диагностирования необходимо решать задачи организации процесса диагностирования (определение периодичности и продолжительности). В ряде случаев при решении этих задач могут быть получены рекомендации по изменению режима использования объекта по назначению.

Для оценки состояния технического объекта (диагностирования) необходимо, во-первых, спроектировать объект, приспособленный к оценке его состояния с требуемой глубиной и достоверностью; во-вторых, создать ТСД, которые позволяли бы оценивать состояние объекта в заданных условиях; в-третьих, определить роль и функции ЧО, участвующего в процессе диагностирования. Иначе говоря, необходимо спроектировать систему диагностирования. Наибольший эффект при диагностировании объекта будет достигнут только в том случае, когда решения, принимаемые при проектировании отдельных элементов системы диагностирования, будут согласованы между собой.

Чтобы объект был приспособлен к диагностированию, необходимо при его проектировании разработать диагностическое обеспечение, включающее перечень оцениваемых диагностических показателей, методы их оценки, условия работоспособности и признаки наличия дефектов, алгоритмы и программу диагностирования. На основе полученного диагностического обеспечения проектируют ТСД, позволяющие оценивать состояние объекта в заданных условиях, и деятельность с учетом принятой степени автоматизации процесса диагностирования. В процессе проектирования определяют практическую эффективность, которую можно достичь при использовании системы диагностирования.

Основная задача производства — обеспечение требований, предъявляемых к объекту и ТСД. Однако уже в процессе производства объекта и ТСД необходимо оценивать их состояние, например состояние отдельных комплектующих изделий и объекта в целом для проверки правильности сборки и монтажа при выходном контроле, а также при настройке, наладке и испытании. Для определения правильности сборки и монтажа на выходном контроле, как правило, проверяют исправность. При настройке, наладке или испытаниях проверяют работоспособность и при необходимости осуществ-

ляют поиск возникшего дефекта. В процессе изготовления комплектующих изделий и элементов ОД в настоящее время часто решают задачу прогнозирования процента выхода годных.

Процесс диагностирования при производстве объекта и ТСД во многом определяют специфика и технология производства. В связи с этим основным в процессе производства будет выбор методов диагностирования, которые должны обеспечивать достаточную глубину и достоверность оценки состояния ОД и ТСД.

В процессе эксплуатации диагностирование выполняют непрерывно или периодически в целях определения работоспособности ОД и ТСД. При необходимости осуществляют прогнозирование или поиск возникшего дефекта для профилактических или восстановительных работ. Диагностирование на этом этапе позволяет обоснованно принимать решения об использовании объекта в требуемый момент времени. Диагностированию подвергают хранящийся или переведенный специально в режим диагностирования объект.

Однако в некоторых случаях диагностируют объект и в период его использования по назначению.

Таким образом, задачи, связанные с необходимостью диагностирования технического объекта на разных стадиях, могут оказаться различными. Это обстоятельство следует учитывать при разработке системы диагностирования, своевременно согласовывая решения, принимаемые при проектировании ее элементов. Отличие в задачах, решаемых при диагностировании объекта на различных стадиях, требует разработки ТСД, предназначенных для использования на конкретных стадиях. Так, технические средства могут предназначаться для диагностирования объектов в процессе производства, в процессе эксплуатации или использования объекта. В ряде случаев идут на компромисс и создают ТСД для диагностирования объектов на всех стадиях.

Система диагностирования эффективна в тех случаях, когда состояние технического объекта будут оценивать на всех стадиях его жизненного цикла. Тогда повышается эффективность использования ОД и надежность его можно поддерживать на уровне, заложенном при проектировании.

6 МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ, УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

6.1. Определение условий работоспособности

Оборудование систем автоматизации технологических объектов добычи, транспорта и переработки нефти и газа состоит из конечного числа элементов, и в нем может возникнуть конечное число дефектов. Это позволяет считать, что оборудование систем автоматизации может находиться в конечном множестве состояний S , которое состоит из подмножества работоспособных состояний S_1 и подмножества неработоспособных состояний S_2 . Разделение множества S на подмножества S_1 и S_2 определяется условием работоспособности.

Состояние оборудования систем автоматизации характеризует совокупность диагностических показателей, т. е. можно говорить о *векторе состояний*, компонентами которого будут диагностические показатели. При этом условие работоспособности задают в пространстве диагностических показателей *областью работоспособности*, исходя из следующих предположений:

- определен вектор состояний технологического оборудования, т.е. совокупность диагностических показателей;
- существует номинальный вектор состояний;
- отклонения вектора состояний (его компонент) от номинального допускаются только в определенных пределах;
- допустимые отклонения компонент вектора состояний (диагностических показателей) определяет область работоспособности оборудования.

В состав оборудования систем автоматизации входят как непрерывные, так и дискретные объекты, условия работоспособности которых формулируют по-разному.

Условия работоспособности непрерывных объектов задают неравенствами, которые ограничивают с одной или с двух сторон значения диагностических показателей:

$$\left. \begin{array}{l} \xi_i > \xi_{iH}, \xi_i < \xi_{iB} \\ \text{или} \\ \xi_{iH} \leq \xi_i \leq \xi_{iB}, i = \overline{1, k} \end{array} \right\},$$

где ξ_i — текущее значение; ξ_{iH}, ξ_{iB} — нижнее и верхнее допустимые значения диагностических показателей.

При этом вектор состояния оборудования имеет следующий вид:

$$S = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k).$$

В качестве компонент вектора состояний можно рассматривать как показатели, определяющие форму характеристики, так и физические параметры.

Задачу определения работоспособности непрерывных объектов сводят к проверке неравенств. Если хотя бы одно из неравенств не выполнено, объект признают неработоспособным.

Если в качестве диагностических показателей рассматривают характеристики оборудования $y = f(x)$, где x и y — входная и выходная переменные, то условия работоспособности определяют степень отклонения текущей характеристики объекта от номинальной

$$\rho_p(f, \varphi) = \left[\int_a^b |f(x) - \varphi(x)|^p dx \right]^{1/p},$$

где $\varphi(x)$ и $f(x)$ — текущая и номинальная характеристики; $p > 0$ фиксированный параметр.

В частном случае, когда $p = \infty$,

$$\rho(f, \varphi) = \sup_{x \in (a, b)} |f(x) - \varphi(x)|,$$

т. е. оценивают наибольшее отклонение характеристик. Тогда условия работоспособности будут $\rho_p(f, \varphi) \leq \varepsilon$ или $\rho(f, \varphi) \leq \varepsilon$, где ε — допустимое отклонение.

Если характеристики оценивают по точкам (рисунок 6.1), то задают области допустимых отклонений для ограниченной совокупности точек на рабочем участке характеристики $x \in (a, b)$, а условия работоспособности — в виде неравенств $|f(x_i) - \varphi(x_i)| < \varepsilon_i$, $i = 0, 1, \dots, n$. Если неравенства справедливы для всей совокупности рассматриваемых точек характеристики, то объект признают работоспособным.

Дискретный объект при определении его работоспособности (рис. 6.2) рассматривают как преобразователь вектора входных воздействий $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в выходной вектор $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, где x_i и y_i — значения сигналов на соответствующих входе и выходе; n и m — числа входов и выходов объекта.

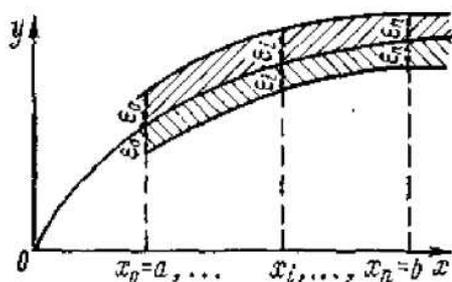


Рисунок 6.1 – Оценка характеристики по точкам

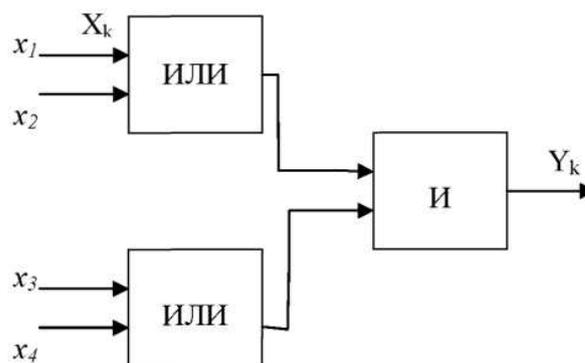


Рисунок 6.2 – Схема дискретного комбинационного объекта

Поскольку каждому входному вектору X_k соответствует определенный выходной Y_k , условием работоспособности дискретного объекта будет соответствие всех возможных входных векторов X_k выходным Y_k ($k = 1, 2, \dots, N$).

При функциональном диагностировании величина N равна числу входных векторов (рабочих воздействий), а при тестовом N определяют, исходя

из условия обеспечения срабатывания всех элементов в объекте. В связи с этим при функциональном диагностировании необходимо выбрать моменты времени, когда следует проверять условие работоспособности, т. е. определять соответствие между входным и выходным векторами, сравнивая выходной вектор с эталонным. При тестовом диагностировании для проверки условий работоспособности необходимо построить минимальную входную последовательность векторов, обеспечивающую оценку состояния всех элементов объекта.

6.2. Степень работоспособности

Обычно допускают некоторый разброс параметров и характеристик технических объектов. Это объясняется, с одной стороны, неточностью изготовления элементов, с другой – самой постановкой задачи, поскольку на практике оказывается допустимой некоторая неточность в выполнении рабочих функций. Для проверяемых показателей (параметров и характеристик) устанавливают опытом или расчетом эксплуатационные допуски. Таким образом, вводят понятие области работоспособности и рассмотрение подмножества работоспособных состояний S_1 . Однако не все состояния в подмножестве S_1 равноценны. Можно предположить, что чем дальше состояние s_j от границ области работоспособности, тем меньше вероятность того, что объект потеряет работоспособность в ближайшее время. Удаление значения показателя от границы области работоспособности как бы увеличивает *запас работоспособности* или повышает *степень работоспособности* объекта. Наоборот, приближение значения диагностического показателя к границе этой области уменьшает запас и снижает степень работоспособности объекта. Для определения степени работоспособности область работоспособности разбивают на ряд подобластей и задают следующие условия (рис. 6.3).

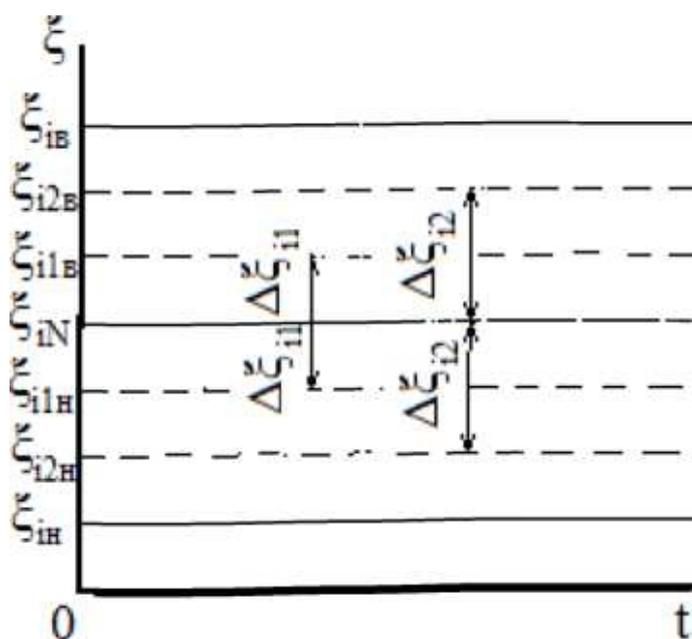


Рис. 6.3. Определение работоспособности

$$\left. \begin{array}{l} \xi_{iN} - \Delta \xi_{ij} \leq \xi_{iN} + \Delta \xi_{ij} \\ \text{или} \\ \xi_i > \Delta \xi_{ij}; \xi_i < \Delta \xi_{ij}, \end{array} \right\}$$

где индекс j характеризует степень работоспособности.

Чтобы ввести понятие степени работоспособности, необходимо дать количественную оценку. Подобную оценку произвести достаточно просто для объекта, состояние которого определяет один диагностический показатель, введя величину, изменяющуюся от 0 до 1,

$$C_i(t, R) = |\xi_i(t, R) - \xi_{ir}| / \Delta \xi_i,$$

где $\Delta \xi_i$ — половина допуска на i -й показатель; $\xi_i(t, R)$ и ξ_{ir} — текущее и граничное допустимые значения; R — режим работы объекта; t — время.

6.3. Методы определения работоспособности непрерывных объектов

Работоспособность непрерывных объектов при функциональном и тестовом диагностировании определяют, оценивая реакцию объекта на рабочие или специальные входные воздействия или оценивая качество выпускаемой продукции. Кроме того, судить о работоспособности объекта можно по алгоритму функционирования или по внешним и косвенным признакам.

Наиболее распространены методы, основанные на оценке реакции объекта на входные воздействия по динамическим и статистическим характеристикам. При этом характеристики оценивают целиком или в одной или нескольких характерных точках.

При оценке статической характеристики, как правило, выбирают совокупность наиболее характерных точек и проверяют соотношение k_i входных и выходных сигналов в этих точках в установившемся режиме. Работоспособность объекта определяют, сравнивая текущие значения k_i с верхней k_{ei} и нижней k_{ni} границами области работоспособности. Если $i > 1$, то объект считают работоспособным только при условии, что все диагностические показатели находятся в областях работоспособности (в допустимых пределах изменения).

Работоспособность объекта по динамической характеристике оценивают, сравнивая реакции объекта y и эквивалентной модели $y_{э*м}$ на один и тот же входной сигнал x (рис. 6.4). В качестве показателя оценки работоспособности объекта принимают

$$y_k = \int_0^{\infty} \delta^2(t) dt,$$

где $\delta(t) = y(t) - y_{э*м}(t)$. При определении работоспособности проверяют условие $\delta(t) \leq \delta_{тр}$, $y_k(t) \leq y_{ктр}$, где индекс «тр» означает требуемое значение.

Если ОД рассматривать как систему второго порядка, то на его динамическую (временную) характеристику в основном будет влиять пара комплексно-сопряженных полюсов. В этом случае о работоспособности ОД судят по коэффициенту затухания ξ , или по собственной частоте ω_0 . Технически это реализуют следующим образом (рис. 6.5, а).

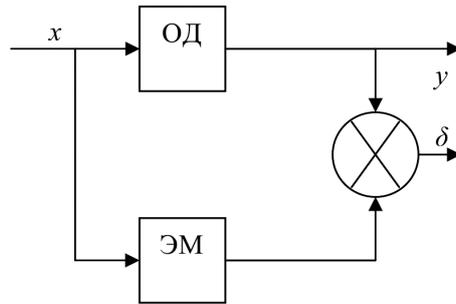


Рис. 6.4. Схема, реализующая метод эквивалентной модели

Если пропустить реакцию объекта на ступенчатый сигнал параллельно через фильтры $Tp/(Tp + 1)$; $1/(Tp + 1)$ ($T = 1/\omega_0$) и двухполупериодные выпрямители ДПВ, а затем сравнить эти сигналы, то их равенство будет говорить о том, что $\omega_0 = \omega_{0н}$, т. е. объект работоспособен. В противном случае объект будет считаться неработоспособным. С другой стороны, если оценить колебательность (число колебаний) по временной импульсной переходной характеристике, то можно судить о величине коэффициента затухания Действительно, временная характеристика будет изменять знак в следующие моменты времени (рис. 6.5, б):

$$t_i = m\pi / (\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}), m=1, 2, \dots$$

При $\omega_0 = const$ каждый момент времени определяется величиной ζ .

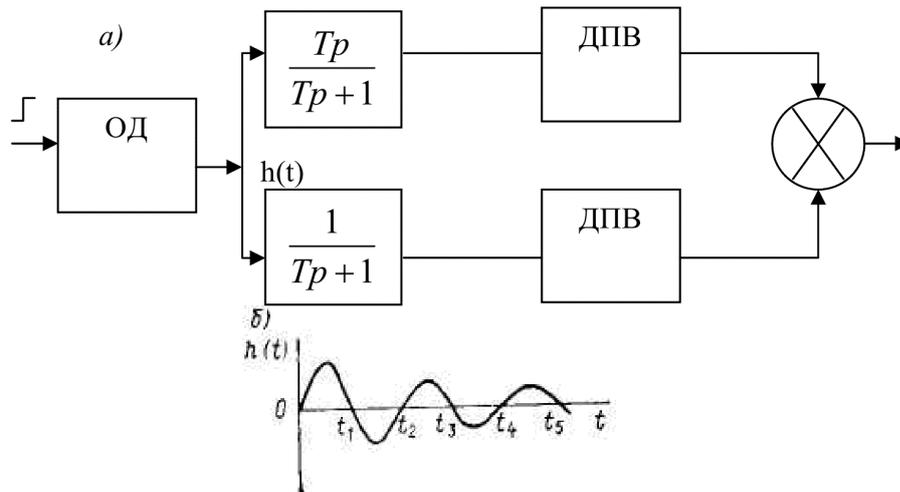


Рисунок 7.5 – Схема (а), реализующая метод определения работоспособности по временной характеристике (б)

Если объект диагностирования сложный, т. е. состоит из нескольких структурных единиц, связанных между собой (рис. 6.6), то его работоспособность оценивают по работоспособности структурных элементов. Используя приведенные выше методы, можно оценить по выходу каждой структурной единице его работоспособность и считать, что ОД работоспособен, если работоспособны все структурные единицы. Тогда работоспособное состояние объекта представляют четырёхмерным вектором $S = (1, 1, 1, 1)$, где каждая компонента равна 1 при работоспособности структурная единица (если структурная единица неработоспособна, то её состояние оценивают 0).

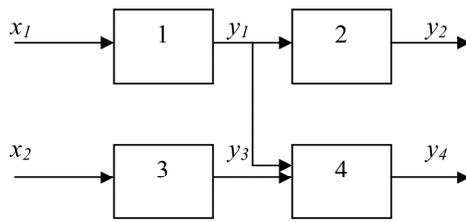


Рисунок 6.6 – Схема объекта, состоящего из нескольких структурных единиц

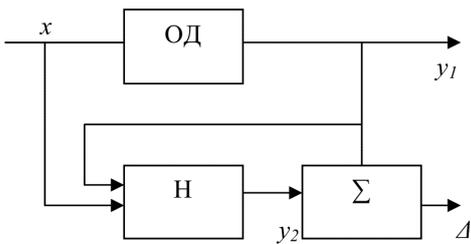


Рисунок 6.7 – Схема, реализующая метод избыточных переменных

При функциональном диагностировании работоспособность сложного объекта оценивают методом *формирования избыточных переменных*. В этом случае рассматривают кроме выходных сигналов объекта и его СЕ $Y_1=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ дополнительные сигналы $Y_2=(y_{n+1}, y_{n+2}, \dots, y_{n+k})$, с помощью которых формируется показатель $\Delta=y_1+y_2+\dots+y_n+y_{n+1}$, равный нулю независимо от входного сигнала, если состояние объекта не изменяется.

Число дополнительных сигналов k , которые должны формироваться специальным блоком H (рис. 6.7) при заданной чувствительности проверки функционирования ρ_k , определяют по формуле

$$k \geq n\rho_k^2 / (1 - \rho_k^2),$$

где ρ_k показывает, насколько отклонение диагностического показателя должно превышать его номинальное значение для достоверной проверки.

Существует еще ряд способов определения работоспособности непрерывных объектов при функциональном и тестовом диагностировании, но все они сводятся к непосредственной оценке характеристик объекта по точкам или к вычислению коэффициентов диагностических моделей, которыми описывают ОД.

6.4. Поиск возникшего дефекта

Поиск возникшего дефекта в отличие от определения работоспособности, как правило, требует более детального анализа ОД или его модели. При этом степень детализации определяет заданная глубина поиска дефекта, т.е. указание части объекта (структурной единицы), с точностью до которой находят место дефекта. Таким образом, если задана глубина поиска возникшего дефекта, то ОД можно представить множеством из взаимосвязанных частей. При поиске возникшего дефекта каждую структурную единицу рассматривают как единое целое, и она может находиться в двух состояниях: «в структурной единице имеется дефект» или «в структурной единице дефект отсутствует». Общее число состояний, в которых может находиться объект, состоящий из N структурных единиц, равно $N + 1$ (одно состояние соответствует отсутствию дефектов в объекте). Следовательно, в предположении, что в объекте одновременно может отказать только одна структурная единица, при поиске дефектов необходимо рассматривать множество, или пространство, из N состояний.

Поиск дефекта или состояния, в котором находится объект, выполняют по алгоритму, включающему определенную совокупность проверок. При этом *проверкой* π называют оценку состояния структурной единицы по её выходу или выходу объекта. Множество состояний в общем случае больше множества проверок, поскольку при выполнении одной проверки можно найти больше одного дефекта. Каждая проверка требует определенных затрат. При построении алгоритма поиска дефекта стараются выбрать такую последовательность проверок, чтобы найти дефект с наименьшими затратами.

Поскольку каждая проверка делит пространство состояний на две части (включающую и не включающую искомое состояние), то результатом выполнения последовательности проверок будет обнаружение структурной единицы, в которой возник дефект. Последовательность проверок или процедуру поиска можно представить графически в виде дерева поиска, где вершинами будут проверки, а ветви указывают последовательность их выполнения. Различают деревья поиска трех видов: последовательные, параллельные и комбинированные.

При *последовательном* поиске каждая проверка выделяет в пространстве поиска одно состояние. На рис. 6.8 приведены все возможные деревья, соответствующие последовательному поиску при числе различных состояний $N = 4$. В общем случае число деревьев при последовательной процедуре $M = 2^{n-2}$.

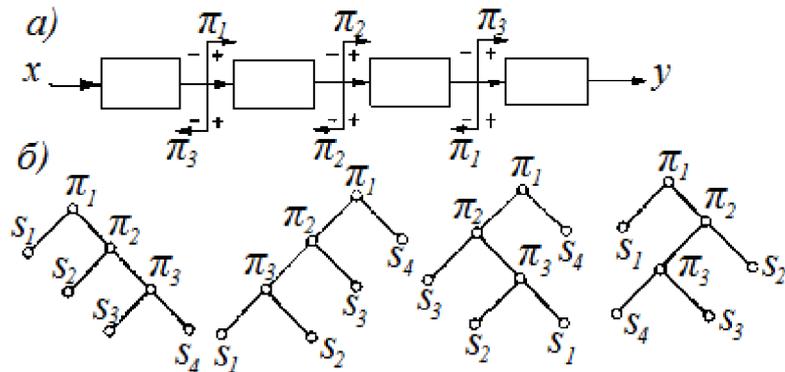


Рисунок 6.8 – Схема ОД (а) и деревья последовательного поиска (б)

При *параллельном* поиске пространство состояний разбивают проверкой на две равные или почти равные части (рис. 6.9, а). Число возможных деревьев в общем случае

$$M = C_{2^k}^{n-2^k},$$

где $k = \lceil \log_2 n \rceil$ – целая часть $\log_2 n$.

Комбинированный поиск представляет собой сочетание последовательных и параллельных процедур (рис. 6.9, б).

Деревья поиска можно построить на основе анализа структуры объекта или используя показатели, определяющие надежность структурной единицы. Деревья поиска дефектов характеризуют суммарной длиной ветвей:

$$L = \sum_{j=1}^n l_j,$$

где l_j – длина j -й ветви.

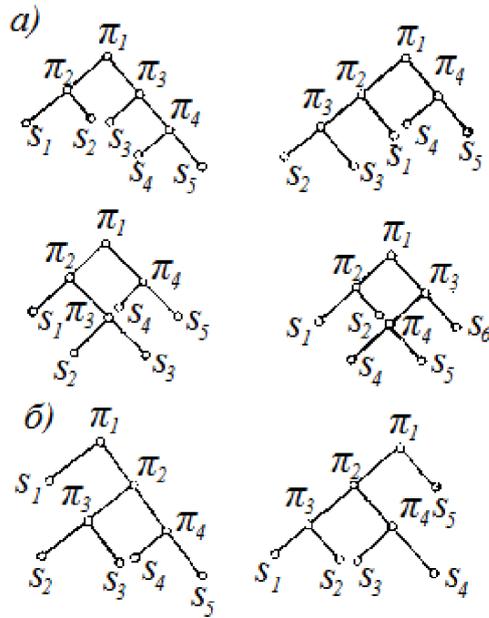


Рисунок 6.9 Деревья параллельного (а) и комбинированного (б) поиска дефектов для объекта из пяти элементов

Для последовательного поиска

$$L_{nc} = \sum_{j=1}^n l_j^{nc} = C_{n-1}^2 + 2(n-1),$$

для параллельного поиска

$$L_{np} = \sum_{j=1}^n l_j^{np} = \sum_{i=1}^{n-1} \log_2 j - 2(n-1).$$

Суммарная длина ветвей дерева комбинированного поиска заключена между этими значениями

$$\sum_{j=1}^n l_j^{np} < \sum_{j=1}^n l_j^{кб} < \sum_{j=1}^n l_j^{nc}.$$

6.5. Алгоритм поиска дефекта

Алгоритм диагностирования – совокупность элементарных проверок в контрольных точках системы и правил, устанавливающих последовательность их проведения, а также анализ результатов этих проверок, по которым можно определить исправное, работоспособное или состояние правильного функционирования от неисправного состояния и уметь отличать дефекты от неисправного состояния.

Последовательность выполнения проверок строят на основании известных значений вероятности отказа структурной единицы. В простейшем случае алгоритм поиска можно представить последовательной процедурой. Чтобы реализовать эту процедуру, структурные единицы объекта, для которых заданы вероятности отказа q_i упорядочивают по величине, затем выполняют проверки начиная со структурной единицы, характеризующейся наибольшим и заканчивая структурной единицей, характеризующейся наименьшим значением q_i .

При построении алгоритма поиска, обеспечивающего наименьшие затраты, предполагают, что длительности всех проверок равны, отказы структурных единиц независимы; отказывает только одна (любая) структурная единица.

Последовательность действий при построении алгоритма следующая:

1 Для каждой i -й структурной единицы определяют вероятность отказа q_i .

2 Все СЕ располагают в порядке убывания q_i .

3 Последние две структурные единицы объединяют в одну условную СЕ, вероятность отказа которой $q = q_n + q_{n-1}$

4 Условную структурную единицу устанавливают на соответствующее место в ряду по величине q .

5 Процесс продолжают до тех пор, пока все структурные единицы не будут объединены в одну условную структурную единицу.

Алгоритм поиска возникшего дефекта представляет собой последовательность выполнения проверок, обратную полученной.

Эффективность диагностирования оценивается качеством алгоритмов диагностирования и качеством средств диагностирования. Средства диагностирования разделяют, прежде всего, на программные и аппаратные, а также внешние (конструктивно выполненные отдельно от системы) и встроенные являющиеся составной частью системы); ручными, автоматизированными и автоматическими; специализированными и универсальными.

Список использованных источников

1. *Ветошкин А.Г.* Надежность технических систем и техногенный риск. – Пенза : Изд-во ПГУАиС, 2003. – 154 с.
2. *Костерев В.В.* Надежность технических систем и управление риском: учебное пособие. – М. : МИФИ, 2008 – 280 с.
3. Малафеев, С. И. Надежность технических систем. Примеры и задачи : учебное пособие / С. И. Малафеев, А. И. Копейкин. – СПб. : Лань, 2012. – 320 с
4. *Половко А. М., Гуров С. В.* Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
5. *Ушаков И. А.* Курс теории надежности систем : учебное пособие для вузов / И. А. Ушаков. – М. : Дрофа, 2008. – 239 с.
6. *Хуснияров М.Х., Сунагатов М.Ф., Матвеев Д.С.* Основы надежности диагностики технических систем: учеб. пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. – 128 с.
7. Чебоксаров, А. Н. Основы теории надежности и диагностика : курс лекций / А. Н. Чебоксаров ; СибАДИ, кафедра ЭиРА. – Омск : СибАДИ, 2012. – 76 с. <http://bek.sibadi.org/fulltext/EPD796.pdf>.