Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Т.Г. Сухоносова
М.Ю. Рябчиков

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Магнитогорск,
2015

УДК 681.5.09

Рецензенты

Старший преподаватель,
АНО КЦПК «Персонал»
Г.Ф. Обухов

Кандидат технических наук,
заместитель директора ЗАО «КонсОМ СКС»,
Ю.Н. Волщуков

Сухоносова Т.Г., Рябчиков М.Ю.
Диагностика и надежность технических средств автоматизации [Электронный ресурс]: Учебное пособие /Татьяна Геннадьевна Сухоносова, Михаил Юрьевич Рябчиков; ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Элек-трон. текстовые дан. (1,2 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Электронный образовательный ресурс посвящен основам надежности систем и технической диагностике. В учебном пособии рассмотрены основные методы расчета показателей надежности и мероприятия по обеспечению и повышению надежности технических средств автоматизации на разных жизненных циклах системы от проектирования до эксплуатации. Представлены необходимые для понимания определения с пояснениями и ссылкой на действующие государственные стандарты в области технической надежности.

Образовательный ресурс предназначен для студентов дневной и заочной форм обучения направления подготовки 220204.62 «Управление в технических системах» при изучении дисциплины «Диагностика и надежность автоматизированных систем».

УДК 681.5.09

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Теория надежности сравнительно молодая прикладная техническая наука, изучающая закономерности возникновения, устранения и предупреждения отказов объектов. Как и многие из технических параметров, надежность на первых этапах использования подвергалась только качественной оценке. Лишь в середине 20 века сформировалась математическая теория надежности, были сформулированы количественные показатели надежности и разработаны инженерные методы их расчета. В теории надежности активно применяются методы сбора и обработки статистических данных для обобщения сведений об отказах, определения математических закономерностей, которым подчиняются отказы. Активно развиваются методы исследования происходящих в аппаратуре физико-химических процессов, приводящих к отказу, изучаются внешние и внутренние воздействия, влияющие на работоспособность.

В настоящее время надежность является одним из основных показателей качества любых технических устройств и систем, в том числе автоматизированных систем управления (АСУ). От надежности зависит безопасность, экономичность, конкурентоспособность, срок эксплуатации системы. Надежность автоматизированных систем закладывается при проектировании и конструировании, реализуется при изготовлении, монтаже системы и расходуется во время эксплуатации. И на каждом из этапов жизни системы на надежность АСУ действуют свои специфические факторы. Изучение закономерностей надежности позволяет сформулировать и формально описать требования, которых следует придерживаться при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации автоматизированных систем для получения максимальной эффективности и безопасности их использования.

В учебном пособии рассмотрены основные методы расчета показателей надежности и мероприятия по обеспечению и повышению надежности технических средств автоматизации на разных жизненных циклах системы от проектирования до эксплуатации. Представлены необходимые для понимания определения с пояснениями и ссылкой на действующие государственные стандарты в области технической надежности.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

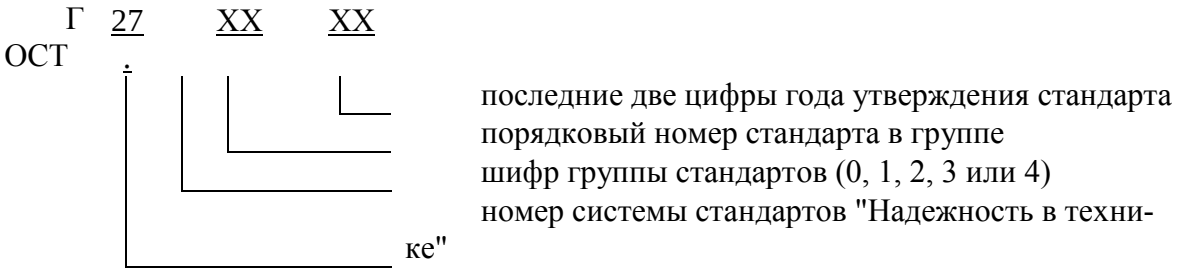
1.1. Стандартизация и качественные показатели надежности

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

В 1965 г. при международной электротехнической комиссии (МЭК) был образован технический комитет ТК 56 «Безопасность и ремонтопригодность». Позже в 1989 г. название технического комитета изменили на «Надежность» (Reliability). Международные организации по стандартам МЭК и ИСО разрабатывают нормативные документы в области управления надежностью и качеством. С 1990 г. ТК 56 придан официальный статус головного комитета, руководящего разработкой стандартов МЭК по управлению надежностью (серия 300) и стандартов ИСО по управлению качеством (серия 9000).

ТК 119 Госстандарта РФ «Надежность в технике» проводит работы по государственной и международной стандартизации, общетехнических аспектов надежности и разработке стандартов. Состав и структура государственных стандартов по надежности представлена в таблице 1.1.

Межгосударственные стандарты, входящие в Систему стандартов «Надежность в технике» (ССНТ), обозначают по единой схеме, имеющей вид:



Приведем ряд важных определений и понятий надежности в соответствии с ГОСТ Р 27.002-2009 «Надежность в технике. Термины и определения».

Для общего *неколичественного описания надежности* используют следующее определение. *Надежность* – свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтопригодности, и поддержка технического обслуживания.

Готовность – это способность изделия выполнить требуемую функцию при данных условиях (климатические, технические или экономические обстоятельства) в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены. Эта способность зависит от сочетания свойств безотказности, ремонтопригодности и поддержки технического обслуживания. Необходимые внешние ресурсы, кроме ресурсов технического обслуживания, не влияют на свойство готовности.

Безотказность – это способность изделия выполнить требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях. Обычно предполагают, что в начале интервала времени изделие в состоянии выполнить требуемую функцию.

Ремонтопригодность – это способность изделия при данных условиях использования и технического обслуживания к поддержанию или восстановлению состояния, в котором оно может выполнить требуемую функцию.

Таблица 1.1

Система стандартов «Надежность в технике» (ССНТ) согласно ГОСТ 27.001-95

Шифр и наименование группы стандартов ССНТ	Объект стандартизации
0 Общие вопросы	0.1 Основные принципы стандартизации в области надежности 0.2 Основные понятия, термины и определения 0.3 Общие правила и методы установления требований по надежности 0.4 Классификация отказов и предельных состояний
1 Организация работ по обеспечению надежности	1.1 Общий порядок обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла, организационные структуры 1.2 Программы обеспечения надежности, планирование работ 1.3 Управление применением комплектующих изделий (надежностные аспекты) 1.4 Информационное обеспечение надежности 1.5 Экспертиза проектов
2 Способы обеспечения	2.1 Общие требования и рекомендации по конструктивным и технологическим способам обеспечения надежности 2.2 Экспериментальная отработка на надежность, моделирование роста надежности 2.3 Ориентированные на обеспечение надежности способы контроля качества и отбраковка потенциально ненадежных объектов 2.4 Назначение и продление срока службы, срока хранения и ресурса 2.5 Обеспечение (поддержание) надежности в эксплуатации
3 Анализ и расчет надежности	3.1 Порядок и общие требования к методам анализа и расчета надежности 3.2 Методы расчета показателей надежности 3.3 Методы расчета надежности с учетом качества программных средств (надежности программного обеспечения) 3.4 Методы расчета надежности с учетом "человеческого фактора" 3.5 Анализ возможных видов, последствий и критичности отказов
4 Испытания, контроль, оценка надежности	4.1 Порядок оценки и контроля надежности 4.2 Правила проведения и общие требования к методам испытаний 4.3 Выбор условий и режимов испытаний 4.4 Предварительная обработка статистических данных о надежности (проверка однородности, сравнение, выявление тренда, проверка вида распределения) 4.5 Оценка показателей надежности по экспериментальным данным 4.6 Планы контрольных испытаний на надежность 4.7 Оценка показателей надежности объектов по данным о надежности их составных частей 4.8 Методы сокращения объемов испытаний форсирование режимов, использование дополнительной информации, контроль и оценка надежности по состоянию технологического процесса.

Долговечность – способность изделия выполнять требуемую функцию до достижения предельного состояния при данных условиях использования и технического обслуживания.

Комплексное материально-техническое обеспечение – процесс скоординированного управления по обеспечению всех материалов и ресурсов, требуемых для эксплуатации изделия.

Сохраняемость – способность изделия выполнять требуемую функцию в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Понятия, относящиеся к состояниям объекта

Объект (технический объект) – любое изделие (элемент, устройство, подсистема, функциональная единица или система), которое можно рассматривать в отдельности. Объект может состоять из технических средств, программных средств или их сочетания и может в частных случаях включать людей, его эксплуатирующих, обслуживающих и/или ремонтирующих.

Элемент – составная часть объекта, рассматриваемая при проведении анализа как единое целое, не подлежащее дальнейшему разукрупнению.

Система – совокупность элементов, объединенных конструкционно и/или функционально для выполнения некоторых требуемых функций.

Восстанавливаемое изделие – изделие, которое при данных условиях после отказа может быть возвращено в состояние, в котором оно может выполнять требуемую функцию.

Невосстанавливаемое изделие – изделие, которое при данных условиях после отказа не может быть возвращено в состояние, в котором оно способно выполнить требуемую функцию.

С точки зрения надежности основными состояниями простого объекта являются работоспособное и неработоспособное состояния.

Работоспособное состояние – это состояние изделия, при котором оно способно выполнить требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы. Изделие в одно и то же время может находиться в работоспособном состоянии для некоторых функций и в неработоспособном состоянии для других функций.

Продолжительность работоспособного состояния – интервал времени, в течение которого изделие находится в работоспособном состоянии.

Накопленная продолжительность работоспособного состояния – сумма отдельных продолжительностей работоспособного состояния в пределах заданного интервала времени.

Состояние функционирования – состояние выполнения изделием требуемой функции.

Наработка: интервал времени, в течение которого изделие находится в состоянии функционирования (выполнения изделием требуемой функции). Наработка может быть непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега) и дискретной величиной (число циклов, срабатываний, запусков).

Состояние нефункционирования – состояние невыполнения изделием ни одной из требуемых функций. *Продолжительность нефункционирования* – интервал времени, в течение которого изделие находится в состоянии нефункционирования.

Требуемое время – интервал времени, в течение которого потребитель требует, чтобы изделие находилось в работоспособном состоянии.

Нетребуемое время – интервал времени, в течение которого потребитель не требует, чтобы изделие находилось в работоспособном состоянии.

Состояние готовности: состояние функционирования изделия в требуемое время. *Время готовности*: интервал времени, в течение которого изделие находится в состоянии готовности.

Свободное состояние – работоспособное состояние нефункционирования изделия в нетребуемое время. *Свободное время* – интервал времени, в течение которого существует свободное состояние.

Занятое состояние – состояние изделия, при котором оно выполняет требуемую функцию для потребителя (потребителей) и по этой причине недоступно для других потребителей.

Дежурное состояние – состояние изделия быть способным выполнить требуемую функцию по запросу. *Дежурное время* – интервал времени, в течение которого существует дежурное состояние.

Неработоспособное состояние – состояние изделия, при котором оно неспособно выполнить требуемую функцию по любой причине. *Продолжительность неработоспособного состояния* – интервал времени, в течение которого существует неработоспособное состояние.

Неработоспособное состояние по внутренней причине – неработоспособное состояние изделия, при котором оно неспособно выполнить требуемую функцию из-за внутренней неисправности или профилактического технического обслуживания.

Накопленная продолжительность неработоспособного состояния по внутренней причине – сумма отдельных продолжительностей неработоспособного состояния по внутренней причине в пределах заданного интервала времени.

Неработоспособное состояние по внешней причине – неработоспособное состояние изделия, при котором оно неспособно выполнить требуемую функцию из-за отсутствия или нехватки внешних ресурсов.

Продолжительность неработоспособного состояния по внешней причине – интервал времени, в течение которого существует неработоспособное состояние по внешней причине.

Предельное состояние – состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по причинам опасности, экономическим или экологическим.

Критерии предельного состояния – это признаки предельного состояния, по которым принимают решение о его наступлении. Типичные критерии предельных состояний:

- отказ одной или нескольких составных частей, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не предусмотрены эксплуатационной документацией (должны выполняться на предприятии-изготовителе или на специализированном ремонтном предприятии);
- механический износ ответственных деталей (узлов) или снижение физических (химических) свойств материалов до предельно допустимого уровня;
- снижение наработки на отказ (повышение интенсивности отказов) ниже (выше) допустимого уровня;
- повышение установленного уровня текущих (суммарных) затрат на техническое обслуживание и ремонт или другие признаки, определяющие экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Критическое состояние – состояние изделия, которое может привести к тяжелым последствиям: травмированию людей, значительному материальному ущербу или неприемлемым экологическим последствиям.

Добавим еще определение для безопасности и живучести. Эти термины не вошли в государственный стандарт «Надежность в технике. Термины и определения», но близки по смыслу с надежностью.

Безопасность – свойство объекта при изготовлении и эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды. Безопасность в определенных условиях тесно связана с надежностью, например, если отказы могут привести к условиям, вредным для людей и окружающей среды сверх установленных санитарных норм.

Живучесть (fail-self concept) – свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации,

или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов и повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов.

В иностранной литературе по надежности для характеристики живучести объектов по отношению к человеческим ошибкам (ошибки оператора, неквалифицированное вмешательство в работу объекта) также применяется специальный термин *fool-proof* (защита от глупости).

В ГОСТ Р 27.002-2009 приводятся созвучные определения свойств и способностей объекта, не относящиеся к основным:

Отказобезопасность – это свойства изделия, ориентированные на сохранение безопасности в случае отказа.

Остойчивость к неисправности – способность изделия продолжать функционирование при определенных видах неисправности.

1.2. Простые показатели надежности

1.2.1. Величины и показатели безотказности

Наработка до отказа – наработка, накопленная от первого использования изделия или от его восстановления до отказа.

Наработка до первого отказа – наработка, накопленная от первого использования изделия до его отказа. Наработка до первого отказа является частным случаем наработки до отказа.

Время между отказами – интервал времени между двумя последовательными отказами восстанавливаемого изделия. Время между отказами включает продолжительность работоспособного состояния изделия и продолжительность неработоспособного состояния изделия.

Наработка между отказами – суммарная наработка восстанавливаемого изделия между двумя последовательными отказами.

Период приработки – начальный период в жизни изделия, если он существует, в течение которого параметр потока отказов восстанавливаемого изделия или интенсивность отказов невосстанавливаемого изделия уменьшаются со временем до относительно постоянного значения.

Период постоянного параметра потока отказов – период в жизни восстанавливаемого изделия, если он существует, в течение которого его параметр потока отказов является приблизительно постоянным.

Период постоянной интенсивности отказов – период в жизни невосстанавливаемого изделия, если он существует, во время которого его интенсивность отказов является приблизительно постоянной.

Период износовых отказов – период в жизни изделия, если он существует, в течение которого параметр потока отказов восстанавливаемого изделия или интенсивность отказов невосстанавливаемого изделия увеличиваются со временем.

Вероятность безотказной работы (ВБР, reliability) $P(t_1, t_2)$ – это вероятность выполнить требуемую функцию при данных условиях в интервале времени (t_1, t_2). Обычно предполагают, что в начале интервала времени изделие находится в работоспособном состоянии. При $t_1 = 0$ и $t_2 = t$, тогда ВБР $P(0, t)$ обозначают просто $P(t)$ и определяют как вероятность следующего события:

$$P(t) = \mathrm{P}(T > t) \qquad (1.1)$$

Статистической оценкой этого показателя является величина:

$$\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \tag{1.2}$$

где N_o – число однотипных объектов (элементов), поставленных на испытания (находящихся под контролем); n(t) – число отказавших объектов за время t, во время испытаний отказавший объект не восстанавливается и не заменяется исправным.

Свойства функции надежности:

- P(0)=1. В момент своего первого включения элемент исправен. Известно, что это предположение не всегда выполняется, но предположим, что выходной контроль действует исправно и бракованных элементов нет.
- $P(\infty) = 0$. Нет «вечных» элементов.
- функция P(t) непрерывна во времени, нет мгновений, точно в которые происходят обрывы или разрушения.
- Функция надежности монотонно убывает.

Вероятность отказа Q(t) – это вероятность того, что в пределах заданной наработки произойдет отказ объекта:

$$Q(t) = \mathrm{P}(T \le t) \tag{1.3}$$

Из (1.3) следует, что вероятность отказа (ВО) есть функция распределения случайного времени работы до отказа Q(t) = F(t). Поскольку работоспособность и отказ являются состояниями несовместимыми и противоположными, то их вероятности связаны зависимостью:

$$P(t) + Q(T) = 1 \tag{1.4}$$

Следовательно, из (1.4) $Q(t) = 1 - P(t)$ и в некоторых случаях удобнее пользоваться вероятностью отказа, а не ВБР. Статистическая оценка ВО:

$$Q(t) = n(t) / N_0 \tag{1.5}$$

Плотность распределения вероятности f(t) определяется как производная от вероятности отказа по времени отказа:

$$\frac{d(tQ)}{dt} = \frac{d(tF)}{dt} = Q'(t) = f(t) \tag{1.6}$$

Мгновенная интенсивность отказов λ(t) – предел (если он существует) отношения условной вероятности того, что момент отказа неремонтируемого изделия произойдет в интервале времени (t, t+Δt) к продолжительности этого интервала Δt, стремящегося к нулю, при условии, что в начале этого интервала изделие находилось в работоспособном состоянии. Мгновенную интенсивность отказов вычисляют по формулам:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0}\left(\frac{1}{\Delta t}\frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{P(t)}\right) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{Q'(t)}{P(t)} = \frac{-P'(t)}{P(t)}, \tag{1.7}$$

где F(t) и f(t) являются функцией распределения и плотностью распределения ВО.

Статистическая оценка интенсивности отказов имеет вид:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{c\ p} \cdot \Delta t_i}\ , \tag{1.8}$$

где $n(\Delta t_i)$ – число отказов однотипных объектов на интервале Δt_i, для которого определяется интенсивность; N_{cpi} – среднее число работоспособных объектов на интервале Δt_i

$$N_{c\ p\ \overline{i}} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}, \tag{1.9}$$

где N_i – число работоспособных объектов в начале интервала Δt_i; N_{i+1} – число работоспособных объектов в конце интервала Δt_i. В некоторых случаях за среднее значение принимают количество работоспособных элементов перед наступлением рассматриваемого интервала, то есть $N_{cpi} = N_i$.

Средняя интенсивность отказов – среднее значение мгновенной интенсивности отказов в интервале времени (t_1, t_2). Среднюю интенсивность отказов вычисляют по формуле

$$\overline{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \tag{1.10}$$

Мгновенный параметр потока отказов z(t): предел (если он существует) отношения среднего числа отказов ремонтируемого изделия в интервале времени (t, t+Δt) к длине этого интервала Δt, стремящейся к нулю:

$$z(t) = \lim_{\Delta t \to 0+} \left(\frac{E\left[N(t + \Delta t) - N(t)\right]}{\Delta t} \right), \tag{1.11}$$

где N(t) – число отказов в интервале времени (0, t); E – математическое ожидание.

Средний параметр потока отказов – среднее значение мгновенной интенсивности отказа в интервале времени (t_1, t_2). Средний параметр потока отказов связан с мгновенным параметром потока отказов z(t) следующим образом

$$\overline{z}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} z(t) dt \tag{1.12}$$

Асимптотический параметр потока отказов $z(\infty)$ – предел, если он существует, мгновенного параметра потока отказов z(t), когда время стремится к бесконечности.

Средняя наработка до первого отказа – математическое ожидание наработки до первого отказа.

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки до отказа определяется так:

$$T_1 = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) d\ i \tag{1.13}$$

Используя взаимосвязь между f(t), Q(t) и P(t), см. формулы (1.4), (1.6), получим

$$T_1 = -\int_0^{\infty} t \cdot P'(t)dt = -t \cdot P(t)\Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^{\infty} P(t)dt \qquad (1.14)$$

поскольку при t = 0 и при $t \to \infty$ произведение tP(t) = 0, то средняя наработка до отказа равна площади, образованной кривой вероятности безотказной работы $P(t)$ и осями координат.

Статистическая оценка для средней наработки до отказа, определяется как среднее арифметическое из наработок до отказа N_0 однотипных образцов, поставленных на испытания:

$$\widehat{T_1} = \frac{1}{N_0}\sum_j^{N_0} t_j \qquad (1.15)$$

где N_o – число работоспособных однотипных невосстанавливаемых объектов, t_j – наработка до отказа j-го объекта.

Средняя наработка между отказами – математическое ожидание наработки между отказами. Рассчитывается для восстанавливаемых объектов и систем.

Таблица 1.2

Взаимосвязь показателей безотказности невосстанавливаемых объектов

Базовые параметры	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$ =	—	$1-Q(t)$	$\int_t^{\infty} f(t)dt$	$e^{-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau}$
$Q(t)$ =	$1-P(t)$	—	$\int_0^t f(t)dt$	$1-e^{-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau}$
$f(t)$ =	$-\frac{dP(t)}{dt}$	$\frac{dQ(t)}{dt}$	—	$\lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau}$
$\lambda(t)$ =	$-\frac{dP(t)}{dtP(t)}$	$\frac{dQ(t)}{d(1-Q(t))}$	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)dt}$	—
T_1 =	$\int_0^{\infty} P(t)dt$	$\int_0^{\infty} tdQ(t)$	$\int_0^{\infty} tf(t)dt$	$\int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau} dt$

1.2.2. Показатели ремонтопригодности

Показатели ремонтопригодности зависят от случайного времени восстановления объекта после отказа. На практике продолжительность восстановления τ_i существенно меньше времени работы между отказами.

Время до восстановления τ_i – интервал времени от момента отказа изделия до момента его восстановления. Когда момент отказа не определен, то предполагают, что интервал времени начинается после обнаружения отказа. Время восстановления зависит от целого ряда факторов: характера возникшего отказа, приспособленности объекта к быстрому обнаружению отказа, квалификации обслуживающего персонала, наличия технических средств, быстроты замены отказавшего элемента в объекте.

Обычно полагают, что распределение величины τ_i (i =1, 2, …, n) не зависит ни от порядкового номера восстановления, ни от длительности предыдущего восстановления, ни от предшествующей наработки между отказами.

Вероятность восстановления за заданное время t $P_в(t)$ – это вероятность события, заключающегося в том, что восстановление за заданный промежуток времени произошло:

$$P_в(t) = \mathrm{P}(\tau \le t) \tag{1.16}$$

Статистическое определение вероятности восстановления определяется как отношение числа восстановлений $k(t_1)$, длительность которых меньше t_1 к общему числу восстановлений m на [0, t], причем $t_1 < t$:

$$\hat{P}_B(t_1) = k(t_1)/m, \tag{1.17}$$

Среднее время восстановления $\mathrm{T_в}$ – это математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа. Среднее время восстановления можно выразить через плотность распределения случайной величины времени восстановления g(t) формула (1.18). Статистически среднее время восстановления $\mathrm{T_в}$ определяется по формуле (1.19), где m – число восстановлений, τ_i – время, затраченное на i-е восстановление, ч:

$$T_B = M(\tau) = \int_0^\infty t g(t) dt \tag{1.18}$$

$$\widehat{T}_B = \sum_{i=1}^{m} \tau_i / m \tag{1.19}$$

Интенсивность восстановления μ(t) это условная плотность вероятности восстановления объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени восстановление не произошло, формула (1.20). Статистическая оценка этого показателя находится по выражению (1.21).

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - P_B(t)} \tag{1.20}$$

$$\hat{\mu}(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{CP} \cdot \Delta t}, \tag{1.21}$$

где $n_в(\Delta t)$ – количество восстановлений однотипных объектов за интервал Δt; $N_{СР}$ – среднее количество объектов, находящихся в невосстановленном состоянии на интервале Δt.

В частном случае, когда интенсивность восстановления постоянна, то есть $\mu(t) = \text{const}$, вероятность восстановления на [0, t] подчиняется экспоненциальному закону и определяется выражением

$$P_в(t) = 1 - e^{-\mu t} \tag{1.22}$$

Частный случай (1.22) имеет наибольшее практическое значение, поскольку он используется в предварительных расчетах надежности восстанавливаемых систем. Из свойств экспоненциального распределения следует:

$$T_B = \frac{1}{\mu} \quad \text{или} \quad \mu = \frac{1}{T_B} \tag{1.23}$$

Таблица 1.3

Аналогии между показателями безотказности и ремонтопригодности

Показатели:	безотказности	ремонтопригодности
Вероятность...	отказа за заданное время t $Q(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau\right]$	восстановления за заданное время t $P_B(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \mu(t)dt\right]$
Интенсивность...	отказов $\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-Q(t)}$	восстановления $\mu(t) = \frac{g(t)}{1-P_B(t)}$
Плотность распределения во времени случайной величины...	отказа $f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}$	восстановления $g(t) = \frac{dP_B(t)}{dt}$
Среднее время...	наработки до отказа $T_О$ $T_O = \int_0^\infty t f(t)dt$	восстановления $T_В$ $T_B = \int_0^\infty t g(t)dt$

1.2.3. Показатели долговечности

Показатели долговечности могут быть заданы для отдельных подсистем или устройств АСУ, для системы же в целом эти показатели обычно не определяются, поскольку такие системы не эксплуатируют до перехода в предельное состояние.

Срок службы – продолжительность эксплуатации изделия или ее возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

Гамма-процентная наработка до отказа $T\gamma$ – наработка, в течение которой отказ не возникнет с вероятностью γ, выраженной в процентах. При простейшем потоке отказов и

экспоненциальном распределении средняя гамма-процентная наработка до отказа Tγ объекта обратно пропорциональна интенсивности отказов λ этого объекта:

$$T_\gamma = -\frac{\ln P_\gamma}{\lambda} \qquad (1.24)$$

Гамма-процентный срок службы – срок службы, в течение которого изделие не достигнет предельного состояния с вероятностью γ, выраженной в процентах.

Процентная наработка системы Tγ – время, в течение которого отказ не наступит с вероятностью γ, %.

Ресурс – суммарная наработка изделия в течение срока службы.

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

Гамма-процентный ресурс – ресурс, в течение которого изделие не достигнет предельного состояния с вероятностью γ, выраженной в процентах.

Если известна средняя наработка до отказа T_0 и известен гамма-процентный ресурс γ, выраженный в процентах, то для экспоненциального распределения:

$$T_\gamma = -T_0 \ln P_\gamma, \quad \text{где} \quad P_\gamma = \frac{\gamma}{100} \qquad (1.25)$$

Остаточный срок службы – срок службы, исчисляемый от текущего момента времени.

Остаточный ресурс – ресурс, исчисляемый от значения наработки в текущий момент времени. Средний гамма-процентный остаточный срок службы определяют аналогично среднему гамма-процентному сроку службы. Средний гамма-процентный остаточный ресурс определяют аналогично среднему гамма-процентному ресурсу.

1.2.4. Показатели сохраняемости

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения изделия, в течение и после которой изделие способно выполнять требуемую функцию.

Гамма-процентный срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения изделия, в течение и после которой изделие способно выполнять требуемую функцию с вероятностью γ, выраженной в процентах.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

1.3. Надежность и эффективность систем автоматизации

От надежности АСУ ТП зависит не только безопасность, экономичность обслуживания, срок эксплуатации самой автоматизированной системы, но и безопасность, эффективность и производительность всего технологического процесса.

Надежность автоматизированных систем закладывается при проектировании и разработке, реализуется при изготовлении, монтаже системы и расходуется во время эксплуатации. И на каждом из этапов жизни системы на АСУ действуют свои специфические факторы. Изучение закономерностей надежности позволяет сформулировать и формально описать требования, которых следует придерживаться при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации автоматизированных систем для получения максимальной эффективности и безопасности их использования.

Например, на этапе разработки системы необходимо четко и грамотно сформулировать основные требования по надежности АСУ.

Нормирование надежности – установление количественных и качественных требований к надежности. Нормирование надежности включает в себя выбор номенклатуры показателей надежности, обоснование численных значений показателей надежности изделия и его составных частей, формулирование критериев отказов и предельных состояний, задание требований к методам контроля надежности, выработку качественных требований к конструкции изделия, техническому обслуживанию, действиям персонала, направленных на обеспечение надежности.

Распределение требований – процедура, применяемая в процессе проектирования изделия, посредством которой требования к надежности изделия распределяют на его составные части по определенным правилам.

При анализе надежности АСУ можно выделить отдельные составляющие: аппаратурную надежность, надежность программного обеспечения (ПО), надежность подсистемы человек-оператор.

- *Аппаратурная надежность* изучена наиболее подробно и зависит от технического состояния аппаратуры, то есть состава технических средств.
- *Надежность программного обеспечения* определяется качеством алгоритмов и программ.
- *Надежность подсистемы человек-оператор* зависит от качества обслуживания системы оператором и удобства интерфейса. В некоторых случаях 25 – 40 % всех отказов АСУ может быть вызвана дефектами и ошибками обслуживания. Например, нарушениями инструкций, ошибками восприятия сигналов, запаздыванием и ошибками в действиях оператора, неполнота и нечеткость инструкций и т.п.

АСУ относятся к сложным системам, так как состоят из множества разнородных элементов. С точки зрения надежности АСУ может находится в одном из работоспособных состояний, отличающихся своей эффективностью или производительностью. Отказ одного элемента или даже нескольких объектов не ведет к отказу всей системы, а лишь снижает эффективность выполнения заданных функций.

В зависимости от назначения различают три класса систем управления. К первому классу относятся системы, которые не могут быть отремонтированы в течение периода эксплуатации. От них требуется безотказная работа в течение заданного времени. Самым важным для таких систем является свойство безотказности.

Системы второго класса длительно находятся в состоянии готовности, а используются кратковременно, в случае необходимости. Эти системы должны в произвольный момент времени быть готовыми к работе и не иметь неисправностей в течение заданного времени. Ремонт систем второго класса проводят во время эксплуатации. Коэффициент технического использования является важным параметром таких систем.

К третьему классу относится аппаратура и устройства, использующиеся непрерывно. Системы третьего класса работают по циклическому режиму: период эксплуатации сменяется восстановлением, затем опять эксплуатация, и опять восстановление.

Для АСУ ТП наиболее важными составляющими надежности являются свойства безотказности и ремонтопригодности, поскольку ее моральное старение происходит, как правило, раньше физического, а транспортировке (до установки в систему) подвергаются только отдельные элементы (аппаратура ЭВМ, датчики), а не система в целом.

Приведем основные факторы, от которых зависит уровень надежности АСУ в соответствии с ГОСТ24.701-86:

- состав и уровень надежности используемых технических средств, их взаимосвязи;
- состав и уровень надежности используемых программных средств, их содержания (возможностей) и взаимосвязи в структуре ПО АСУ;
- влияние человека-оператора и обслуживающего персонала (уровень квалификации, организации работы);

- рациональности распределения задач, решаемых системой между КТС АСУ, ПО АСУ и персоналом АСУ;
- режимов, параметров и организационных форм технической эксплуатации КТС АСУ;
- степени использования различных видов резервирования;
- степени использования методов и средств технической диагностики;
- реальных условий эксплуатации АСУ.

1.3.1. Факторы влияющие на аппаратурную надежность

Надежность и эффективность технических систем зависит от множества факторов. Классификация влияющих на надежность факторов на разных жизненных циклах представлена в таблице 1.4.

Основной климатический фактор влияющий на свойства работоспособности технических систем это температура. Отрицательно сказывается на работе систем как слишком высокие, так и слишком низкие температуры воздуха. Высокая или слишком низкая влажность воздуха, солнечная радиация, атмосферные явления в виде дождя, снега, инея, тумана, пыльные бури тоже являются негативными факторами, в случае если система или ее части (например, соединительные провода, датчики, механизмы) расположена на открытом воздухе [1].

К негативным биологическим факторам относят мелких животных, насекомых и грибок. Учет влияния внешних факторов при расчете надежности рассмотрен в п. 2.1.4.

Таблица 1.4

Факторы влияющие на надежность

Конструктивные	Производственные	Эксплуатационные	
		Объективные	Субъективные
Этап проектирования и конструирования	Этап производства отдельных элементов системы, монтажа и наладки	Воздействия внешней среды и изменения параметров самой системы в ходе эксплуатации	Воздействия обслуживающего персонала во время эксплуатации системы
1) выбор структурной и функциональной схемы, способов резервирования и контроля; 2) выбор режимов и условий работы элементов; 3) назначение требований к допускам на технологические характеристики; 3) разработка эксплуатационной документации.	1) входной контроль качества материалов и элементов; 2) организация технологического процесса изготовления; 3) обеспечение качества и контроль монтажа и наладки системы.	1) климатические факторы; 2) механические воздействия; 3) излучения; 4) биологические факторы; 5) производственные факторы; 6) старение и износ оборудования, материалов.	1) квалификация обслуживающего персонала; 2) организация и качество техобслуживания; 3) методы и способы организации эксплуатации объектов; 4) организация сбора и анализа сведений об отказах и неисправностях.

1.3.2. Надежность программного обеспечения автоматизированных систем

Надежность программного обеспечения, впрочем, как и математического (МО) или информационного обеспечения, не является самостоятельным свойством систем, так как может проявляться лишь в процессе работы аппаратно-технических средств или комплексов технических средств. Поэтому правильным является подход, при котором надежность ПО оценивается по степени влияния на комплексные показатели надежности системы, имеющей в своем составе техническое, МО, ПО и информационное обеспечение. Это важно еще и потому, что отказы технического и программного комплексов являются взаимозависимыми событиями.

Не смотря на указанное выше обстоятельство, в ряде случаев можно получить отдельные оценки показателей надежности для КТС и ПО, а затем их объединить по схеме независимых событий.

Особенности ПО с точки зрения анализа надежности [5]:

- ПО не подвержено износу;
- ПО не содержит (почти) ошибок на стадии производства;
- ПО содержит ошибки систематического характера;
- в процессе отладки и опытной эксплуатации ПО можно устранить дефекты и уменьшить интенсивность отказов в дальнейшем, то есть ПО – «молодеющая» система;
- зависимость результата работы ПО от используемой входной информации и ошибок, содержащейся в этой информации;
- зависимость ошибок ПО от области применения.

Таблица 1.5

Основные количественные показатели свойств надежности ПО

Свойства надежности ПО	Мера	Шкала
Завершенность: наработка на отказ при отсутствии рестарта; степень покрытия тестами функций и структуры программ	 ч %	 10 –1000 50 – 100
Устойчивость: наработка на отказ при наличии автоматического рестарта; относительные ресурсы на обеспечение надежности и рестарта	 ч %	 10 – 1000 10 – 90
Восстанавливаемость: длительность восстановления	мин	10^{-2} – 10
Доступность-готовность: вероятность работоспособного функционирования; коэффициент готовности	 вероятность вероятность	 0.9 – 0.999 0.9 – 0.999

Также рекомендуется по аналогии с надежностью аппаратуры количественно оценивать надежность ПО вероятностью правильного функционирования при определенных условиях эксплуатации ПО, средней наработкой на отказ и интенсивностью отказов.

Получение оценок показателей надежности ПО производится с помощью моделей надежности программ.

Структурную схему для проектной оценки надежности ПО АСУ обычно делят на ПО верхнего уровня (SCADA-системы, HMI-программы) и ПО нижнего уровня (алгоритмы модулей ввода-вывода, выработки управляющих воздействий, интерфейсные алгоритмы передачи данных).

Компоненты ПО АСУ (объекты уязвимости), которые могут быть искажены или разрушены при наличии ошибок и дефектов ПО:

- вычислительный процесс,
- информация баз данных,
- объектный код программы,
- информация для потребителей.

Таблица 1.6

Основные группы ошибок ПО, которые вызывают отказы объектов уязвимости

внутренние отказы и дефекты	внешние отказы и дефекты
• ошибки проектирования при постановке задач; • ошибки алгоритмизации задач; • ошибки программирования.	• ошибки персонала при эксплуатации; • искажения информации в каналах связи; • сбои и отказы аппаратуры АСУ; • изменения конфигурации системы.

Статистический анализ ошибок может помочь разработчикам ПО правильно распределить усилия при проектировании и отладке программ. Анализ выявленных ошибок показывает их глубокую связь с методами системного проектирования и структурного построения программ, типом языка программирования, уровнем автоматизации технологии разработки и со многими другими факторами.

Регистрация, сбор и анализ ошибок ПО это сложный и трудоемкий процесс. Кроме того, разработчики программ не склонны обнажать свои погрешности и качество собственного труда, поэтому достаточно трудно составить объективную картину зависимости зафиксированных ошибок ПО от разнообразных факторов программирования.

Первичные ошибки в ПО в порядке усложнения их обнаружения и увеличения ресурсов, необходимых для их устранения, можно разделить на следующие типы:

- технологические ошибки подготовки машинных носителей и документации, а также ввода программ в память ЭВМ и вывода их на средства отображения;
- программные ошибки вследствие неправильной записи исходного текста на языке программирования и ошибок трансляции программ в объектный код;
- алгоритмические ошибки, связанные с неполным формированием необходимых условий решения и некорректной постановкой задач;
- системные ошибки, обусловленные отклонением функционирования ПО в реальной системе и характеристик внешних объектов от предполагавшихся при проектировании ПО.

При автономной работе и в начале комплексной отладки доля системных ошибок невелика (около 10 %), но она существенно возрастает (35 – 40 %) на завершающих этапах

комплексной отладки. В процессе сопровождения системные ошибки являются преобладающими и достигают 80 % от всех ошибок [5].

Основные методы обеспечения и повышения надежности программных средств АСУ:

- использование CASE-технологий (Computer Aided Software/System Engineering) на всех стадиях жизненного цикла ПО, включая анализ и формулировку требований, проектирование прикладного программного обеспечения и баз данных, генерацию кода, тестирование, документирование;
- систематическое тестирование;
- обязательная сертификация;
- применение оперативных методов повышения надежности ПО [5]:

−временная избыточность;

−информационная избыточность;

−программная избыточность.

1.3.3. Надежность оперативного персонала автоматизированных систем

Надежность оперативного персонала является одним из важнейших свойств, влияющих на качество, эффективность и безопасность работы АСУ ТП. Традиционно под надежным оператором подразумевают хорошего оператора.

Идеальный оператор – это пунктуальный, дисциплинированный и ответственный специалист, способный четко и точно выполнить инструкцию в предусмотренных для этого случаях, одновременно обладающий достаточными знаниями, опытом и волевыми качествами чтобы хладнокровно найти выход из экстремальных непредвиденных ситуаций.

АСУ ТП с технической точки зрения это совокупность множества связанных и взаимодействующих друг с другом датчиков, преобразователей, механизмов, агрегатов, вычислительных машин и комплексов. С другой стороны АСУ ТП в полном объеме не может выполнять свои функции без участия человека (оператора). Поэтому АСУ ТП является системой объединяющей техническую и биологическую системы, где часть функций по управлению возложена на человека, а часть – на технические средства.

Человек и техническая система не взаимодействуют друг с другом непосредственно. Например, человек-оператор в процессе работы управляет задвижками, переключателями дистанционно, ему не нужно находится в помещении, где расположено технологическое оборудование; сидя за щитом или пультом управления оператор может не видеть цеховое помещение с промышленными агрегатами.

Взаимодействие человека с АСУ составляет еще один компонент систем. Этот компонент – математическая, физическая или какая-либо иная интеллектуальная система, описывающая закономерности функционирования и управления АСУ, см. рис. 1.1 [1]. Система знаний может быть субъективной (основываться на знаниях и представлениях оператора) или объективной (экспертная система с формализацией и обобщением опыта проектирования, эксплуатации и анализа АСУ).

Система "человек – машина" – это такая система, в которой человек-оператор находится не непосредственно у объекта труда, а удален от него и осуществляет управление, используя информационную модель.

Человеко-машинный интерфейс, Human Machine Interface (HMI) – это комплекс программных и аппаратных средств, дающих человеку, работающему с машиной, возможность видеть состояние всех важных показателей работы машины и выдавать управляющие или корректирующие воздействия к машине. При этом все органы управления и индикаторы собраны на одном рабочем месте, создается интуитивно понятное схематичное изображение машины, облегчается ввод массивов информации, заданий или управляющих воздействий.

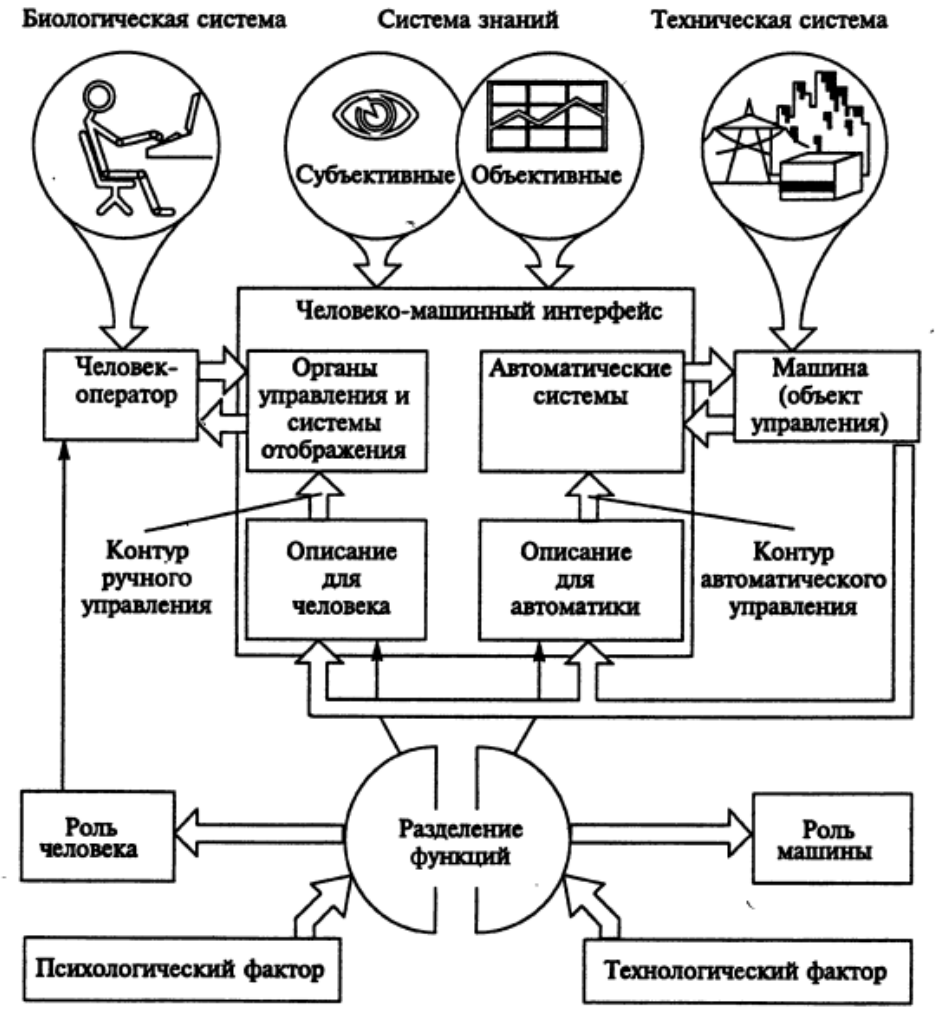


Рис. 1.1 Структура систем взаимодействия "человек – машина"

Под отказом оператора стоит понимать любое действие (или бездействие), которое ведет к ухудшению эффективности рабочего процесса.

Ошибка оператора – любое неправильное действие, которое не повлекло за собой отказ системы, или было своевременно исправлено или парированы самим же оператором.

Классификация ошибок оперативного персонала по семи признакам:

1) по профессиональной группе персонала: оператор-технолог, диспетчер, программист, техник по облуживанию, слесарь, электрик, инженерно-технический персонал;

2) по месту совершения ошибки: центральный пульт, местные щиты;

3) виду производственного процесса, во время которого была совершена ошибка: производство, техническое обслуживание, испытания;

4) типу выполняемой работы: подготовка, исполнение, контроль, отчет;

5) типу психического процесса: ошибки восприятия (обнаружение, идентификация, интерпретация), ошибки мышления (рассуждения, принятия решений), моторики (действия), ошибки коммуникации (передачи команд);

6) характеру ошибки: пропуск, путаница, несвоевременность действия, неподходящее действие;

7) скорости наступления последствий: немедленно, с задержкой.

Существует другой вид классификации ошибок операторов по В.В. Зверкову [1]:

1) ошибки информационные: неверная интерпретация, не заметил;

2) ошибки аналитические в процессе мышления, интуитивных действий при недостатке опыта и знаний;

3) ошибки сенсомоторные, связанные с отсутствием навыков у человека-оператора, незнанием места расположения кнопок, переключателей.

Констатация существующей статистики ошибок операторов, см. рис. 1.2, 1.3, не достаточна, необходимо проанализировать причины их возникновения для предупреждения и снижения числа ошибок.

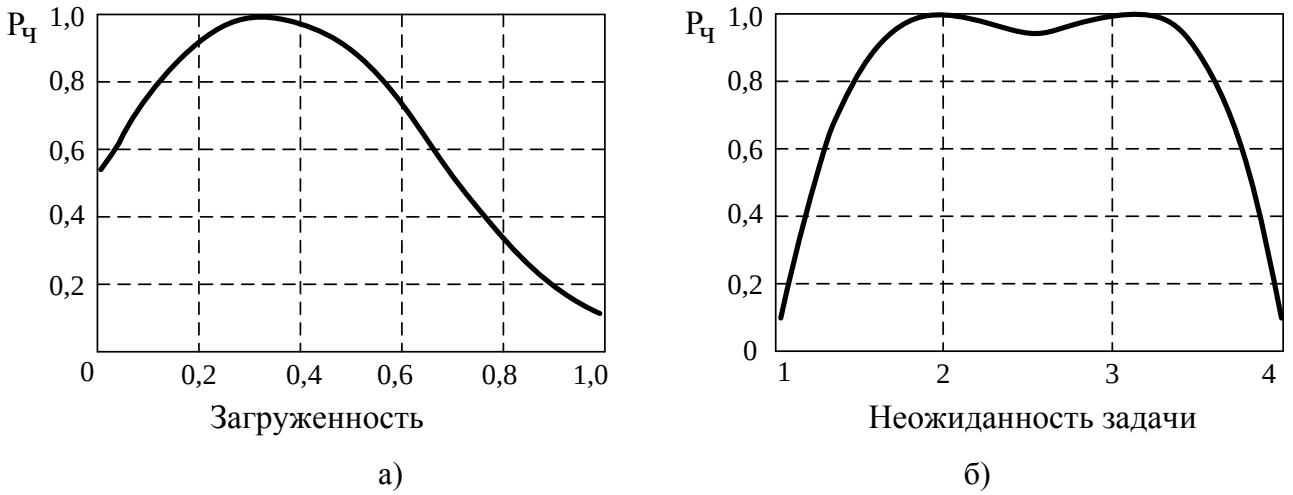


Рис.1.2. Статистические зависимости: а) загруженность оператора – надежность $P_ч$; б) неожиданность задачи – надежность $P_ч$

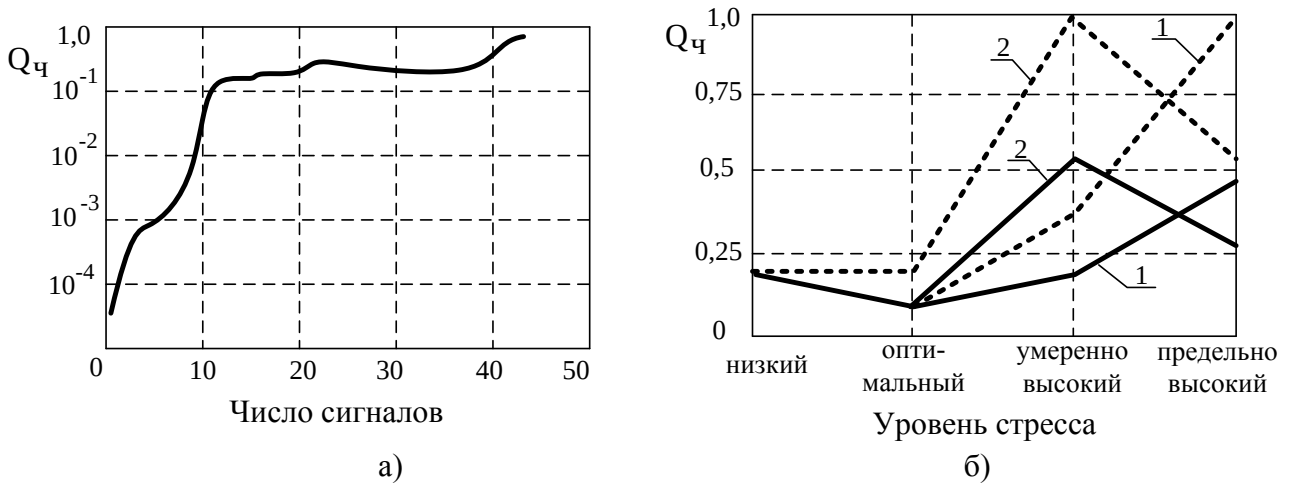


Рис.1.3. Статистические зависимости: а) число возникших сигналов – вероятность отказа $Q_ч$; б) стресс – вероятность отказа $Q_ч$: —— опытный оператор; - - - неопытный оператор; 1 – статическая задача, 2 – динамическая задача

В чем же причина ошибочных действий технического персонала АСУ ТП? Обобщенно причины, вызывающие ошибки представлены на рис. 1.4 [1].

При анализе необходимо указать следующие основные причины ошибок операторов:

- отсутствие процедуры (плохая организация труда, управление персоналом);
- нечеткое взаимодействие (нарушена коммуникация);
- недостаточная тренированность (низкая квалификация);
- плохой человеко-машинный интерфейс (неудобная, непонятная программа);
- неадекватная рабочая среда (низкая культура охраны труда);
- отсутствие мотивации.

Управление персоналом: плохая организация работы, сложность поставленных задач, низкая культура безопасности.

Поддержка персонала: неадекватные процедуры или их отсутствие, несоответствующие поставленным задачам технические средства и системы управления, неэргономичность оборудования и ПО.

Личные качества: недостаточная квалификация персонала, неподходящие личные качества, отсутствие мотивации, нетренированность.

Рис.1.4 Причины ошибок операторов

1.4. Отказы и неисправности

Отказ это потеря способности изделия выполнить требуемую функцию. Иначе говоря, событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Критерий отказа – заранее оговоренные признаки нарушения работоспособного состояния, по которым принимают решение о факте наступления отказа.

Ошибка – несоответствие между вычисленным, наблюдаемым или измеренным значением (состоянием) и истинным (действительным), заданным или теоретически правильным значением (состоянием). *Ошибка человека* – действие человека, приведшее к непреднамеренному результату.

Вид отказа – совокупность возможных или наблюдаемых отказов элемента или системы, объединенных в некоторую классификационную группу по общности одного или нескольких признаков. Например, виды отказов по причинам, механизму возникновения, внешним проявлениям и прочее, кроме последствий отказа.

Тяжесть последствий отказа – качественная или количественная оценка вероятного (наблюдаемого) ущерба от отказа элемента или системы.

Категория тяжести последствий отказов – классификационная группа отказов по тяжести их последствий, характеризуемая определенным, установленным до проведения анализа сочетанием качественных или количественных учитываемых составляющих ожидаемого (вероятного) отказа или нанесенного отказом ущерба.

Ресурсный отказ – отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

Сбой – самоустраняющийся отказ, характерен для цифровых устройств, а также возникает при передаче информации.

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния. Переход объекта из исправного состояния в неисправное не связан с отказом.

Дефект, согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2000, это каждое отдельное несоответствие объекта установленным нормам или требованиям. По ГОСТ 27.001-95, дефект – невыполнение требования, связанного с предполагаемым или установленным использованием. Дефект отражает состояние, отличное от отказа. Отказ может быть следствием развития неустраненных повреждений или наличия дефектов.

Критерий отказа – признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической или конструкторской (проектной) документации. Типичные критерии отказов:

- прекращение выполнения объектом заданных функций (отказ функционирования);
- снижение качества функционирования по одному или нескольким из выходных параметров (производительность, мощность, точность) за пределы допускаемого уровня (параметрический отказ);
- искажения информации на выходе объектов, имеющих в своем составе ЭВМ или другие устройства дискретной техники из-за сбоев;
- внешние проявления, связанные с наступлением или предпосылками наступления неработоспособного состояния (шум, вибрации, перегрев).

1.4.1. Классификация отказов и неисправностей

Рассматривая виды отказов АСУ можно выделить:

- отказы аппаратуры,
- отказы программного обеспечения (ПО),
- отказы подсистемы человек-оператор.

Более всего разработаны и изучены методы анализа аппаратурных отказов. Исследования надежности программного обеспечения и надежности человека-оператора автоматизированных систем управления активно развиваются лишь в последние десятилетия.

Систематический отказ – отказ, однозначно вызванный определенной причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, правил эксплуатации и документации. Систематический отказ может быть воспроизведен путем преднамеренного создания тех же самых условий, например, с целью определения причины отказа. Он является результатом систематической неисправности.

Отказ вследствие изнашивания – отказ, вероятность возникновения которого возрастает с течением времени из-за накапливаемых ухудшений, вызванных прилагаемыми при использовании нагрузками.

Отказ вследствие старения – отказ, вероятность возникновения которого увеличивается из-за накапливающихся ухудшений с течением календарного времени.

Отказы по общей причине – отказы различных изделий или их составных частей, происходящие из-за одного события, если эти отказы не являются следствиями друг друга.

Отказы общего вида – отказы различных изделий или их составных частей, характеризующиеся одним и тем же видом отказа. Отказы общего вида могут иметь различные причины, а также могут быть отказами по общей причине.

Проявление скрытой неисправности – отказ, который указывает на существование скрытой неисправности.

Критичность отказа – оценка возможной степени тяжести последствий отказа.

Критический отказ – отказ, который может привести к тяжелым последствиям: травмированию людей, значительному материальному ущербу или неприемлемым экологическим последствиям.

Показатель критичности отказа – количественная характеристика критичности отказа, учитывающая его вероятность за время эксплуатации и тяжесть возможных последствий.

Критичный элемент – элемент системы, отказ которого может быть критическим.

Таблица 1.7

Классификация аппаратурных отказов по признакам

Классификационный признак	Вид отказа	Определение
По характеру изменения параметров объекта - случайного процесса	Внезапный	Отказ характеризуется скачкообразным изменением параметра
	Постепенный	Отказ характеризуется постепенным изменением параметра (параметрический отказ)
По степени нарушения функционирования	Полный	Отказ, характеризующийся потерей способности изделия выполнять все требуемые функции
	Частичный	Отказ, характеризующийся потерей способности объекта выполнять некоторые, не все требуемые функции и приводящий к снижению эффективности работы системы
По устойчивости (во времени) состояния неработоспособности	Устойчивый	Требуются специальные процедуры восстановления работоспособного состояния
	Самоустраняющийся	Самоустраняющийся отказ (сбой)
По связи с предыдущим отказом	Первичный (независимый)	Отказ, не вызванный прямо или косвенно другим отказом или неисправностью
	Вторичный (зависимый)	Отказ, вызванный другим отказом или неисправностью
По наличию внешних проявлений	Явный	Отказ обнаруживается непосредственно после его возникновения
	Неявный	Отказ не обнаруживается непосредственно после его возникновения

Повреждение – приемлемая для пользователя неполная способность изделия выполнить требуемую функцию.

Неисправность – состояние изделия, характеризующееся неспособностью выполнить требуемую функцию, исключая такую неспособность во время профилактического технического обслуживания или других запланированных действий или из-за нехватки внешних ресурсов. Понятия, относящиеся к неисправностям представлены на рис. 1.5.

Рис. 1.5. Виды неисправностей

1.4.2. Анализ видов, последствий и критичности отказов

При анализе видов, последствий и критичности отказов следует руководствоваться стандартом ГОСТ 27.310-95 «Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения». Указанный стандарт соответствует международному стандарту МЭК 812(1985) в части определений, общих положений и методов анализа.

Анализ видов и последствий отказов – качественный метод анализа, основанный на исследовании возможных видов отказов и неисправностей составных частей и их влияния на изделие. Выражение «анализ видов и последствий неисправностей» также может использоваться в подобном смысле.

Анализ видов, последствий и критичности отказов (АВПКО) – количественный или качественный метод анализа, основанный на анализе видов и последствий отказов вместе с рассмотрением вероятности возникновения видов отказов и серьезности последствий. Выражение «анализ видов, последствий и критичности неисправностей» также может использоваться в подобном смысле.

Идентификация опасности – процесс распознавания опасностей, которые могут произойти, определение их причин и характеристик.

Анализ риска – систематическое использование информации для определения источников и количественной оценки риска. Анализ риска обеспечивает базу для оценивания риска, мероприятий по снижению риска и принятия риска. Информация может включать в себя исторические данные, результаты теоретического анализа, информированное мнение и касаться причастных сторон.

АВПКО проводят с целью обоснования, проверки достаточности, оценки эффективности и контроля за реализацией управляющих решений, направленных на совершенствование конструкции, технологии изготовления, правил эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта объекта и обеспечивающих предупреждение возникновения или ослабление тяжести возможных последствий его отказов, достижение требуемых характеристик безопасности, экологичности, эффективности и надежности.

При категорировании отказов по тяжести их последствий должны учитываться, по крайней мере, следующие факторы в различных сочетаниях, см. таблицу 1.8:

- опасность отказа (с учетом немедленных и отдаленных последствий) для жизни и здоровья людей (в том числе, не связанных непосредственно с эксплуатацией объекта), для окружающей среды, для целостности и сохранности самого объекта, другого имущества и материальных объектов;
- влияние отказа на качество функционирования объекта и полноту выполнения им назначенных функций, возможный ущерб любого вида (материальный, моральный, политический и др.), обусловленный снижением качества функционирования объекта или невыполнением объектом определенных функций (поставленных задач);
- скорость развития неблагоприятных последствий отказа, определяющая возможность принятия соответствующих мер защиты от них.

Таблица 1.8

Пример возможной классификации отказов

Категория тяжести последствий отказов	Характеристика тяжести последствий отказов
IV	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей, срыв выполнения поставленной задачи
III	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта или для окружающей среды, срыв выполняемой задачи, но создает пренебрежимо малую угрозу жизни и здоровью людей
II	Отказ, который может повлечь задержку выполнения задачи, снижение готовности и эффективности объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей
I	Отказ, который может повлечь снижение качества функционирования объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей

Критичность отказов при АВПКО оценивают с использованием показателей, учитывающих для каждого анализируемого отказа объекта:

- вероятность его возникновения за время эксплуатации;

- условные вероятности наступления всех возможных неблагоприятных последствий отказа, если он может сопровождаться несколькими различными по характеру и тяжести последствиями;
- размер возможного ущерба в результате наступления каждого из ожидаемых последствий отказов.

В общем случае показатель критичности отказа представляет произведение его вероятности на средневзвешенный по условным вероятностям проявления последствий отказа размер ущерба от него, хотя, возможно применение иных способов измерения критичности отказов.

Для определения возможного ущерба от наступления определенных последствий каждого отказа в АВПКО применяют:

- относительные балльные оценки для объектов, абсолютные оценки последствий отказов которых невозможны или нецелесообразны;
- показатели, представляющие числовые характеристики соответствующих функций потерь, например распределения ущерба от отказов в денежном или ином натуральном выражении, и оцениваемые методами прогнозирования по априорным данным или путем моделирования.

1.5. Комплексные показатели надежности

Эксплуатация восстанавливаемых объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работу и продолжает ее до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособности и объект вновь работает до отказа и т.д., см. рис. 1.6:

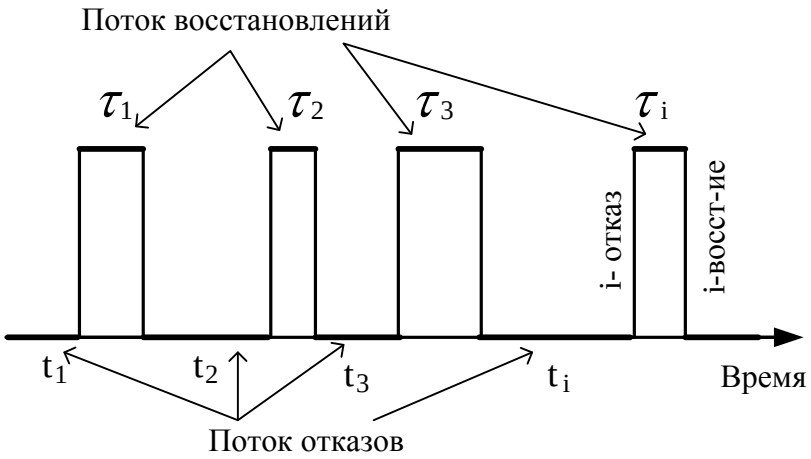


Рис. 1.6. График функционирования восстанавливаемого объекта:
$t_1 \ldots t_n$ – интервалы работоспособности; $\tau_{1 \ldots} \tau_n$ – интервалы восстановления

Временные отрезки t_1 (τ_i) отсчитываются от момента начала очередного отказа (восстановления). Последовательность временных отрезков $\{t_1, t_2, \ldots, t_n\}$ образует поток отказов, а последовательность $\{\tau_1, \tau_2, \ldots, \tau_n\}$ – поток восстановлений. Последовательность временных отрезков $\{t_1+\tau_1, t_2+\tau_2, \ldots, t_n+\tau_n\}$ образует поток отказов – восстановлений. Поток это последовательность событий, происходящих одно за другим в случайные моменты времени.

Кроме приведенных выше показателей, каждый из которых характеризует одну из составляющих надежности, используются также комплексные показатели, отражающие совместно безотказность и ремонтопригодность. К ним относятся коэффициент (функция) готовности $К_г$ **(**$К_г$**(t)),** коэффициент оперативной готовности $К_{ог}$ **(**t), коэффициент технического использования $К_{ти}$, коэффициент сохранения эффективности $К_{эф.}$

Коэффициент готовности (в области надежности в технике) – вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии, определенная в соответствии с проектом при заданных условиях функционирования и технического обслуживания.

Эксплуатационный коэффициент готовности – вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии, определенная из опыта при фактических условиях функционирования и технического обслуживания.

Мгновенный коэффициент готовности A(t) – вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии.

Мгновенный коэффициент неготовности U(t) – вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в неработоспособном состоянии при условии, что необходимые внешние ресурсы предоставлены.

Средний коэффициент готовности – среднее значение мгновенного коэффициента готовности на интервале времени (t_1, t_2).

Средний коэффициент неготовности – среднее значение мгновенного коэффициента неготовности на интервале времени (t_1, t_2).

Стационарный коэффициент готовности A – предел, если он существует, мгновенной готовности, когда время стремится к бесконечности. При определенных условиях стационарный коэффициент готовности может быть выражен как отношение средней продолжительности работоспособного состояния к сумме средней продолжительности работоспособного состояния и средней продолжительности неработоспособного состояния по внутренней причине.

Стационарный коэффициент неготовности U – предел, если он существует, мгновенной неготовности, когда время стремится к бесконечности.

Средняя продолжительность работоспособного состояния – математическое ожидание продолжительности работоспособного состояния.

Средняя продолжительность неработоспособного состояния – математическое ожидание продолжительности неработоспособного состояния.

Функцией готовности $К_г$ (*t*) называют вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Обозначим $P_к(t)$ – вероятность события: (*k*-1)-восстановление после отказа произошло, а *k*-отказ еще не наступил, см. рис. 1.6, тогда

$$K_Г(t) = P(t) + \sum_к P_k \ , \qquad (1.26)$$

где P (t) – вероятность безотказной работы объекта за время t, k= 1, 2, 3,…

Коэффициентом готовности $К_Г$ называется установившееся значение функции готовности

$$K_Г = \lim_{t\to\infty} K_Г(t) \qquad (1.27)$$

При рассмотрении одной реализации потока отказов-восстановлений на продолжительном отрезке времени работы коэффициент готовности – $К_г$ определяется так:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{n} \tau_i}, \quad \text{а при } t \to \infty: \quad K_{\Gamma} = \frac{T_B}{T_O + T_B}, \tag{1.28}$$

где n – наблюдаемое число отказов–восстановлений.

Таким образом, коэффициент готовности $K_Г$ численно равен средней доле времени, в течение которого объект пребывает в работоспособном состоянии. Из выражения (1.28) видно, что коэффициент готовности объекта возрастает как при увеличении средней наработки на отказ, так и при уменьшении среднего времени восстановления. В любом случае это потребует дополнительных денежных затрат. Для определения коэффициента готовности необходим достаточно длительный календарный срок функционирования объекта.

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что изделие в данный момент времени t_1 находится в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнит требуемую функцию при данных условиях в интервале (t_1, t_2). Коэффициент оперативной готовности при определенных условиях представляет собой произведение коэффициента готовности и вероятности безотказной работы. Из вероятностного определения следует, что

$$K_{O\ (t)} = K_{\Gamma} P(t), \tag{1.29}$$

где $K_Г$ – коэффициент готовности; $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта в течение времени t, необходимого для безотказного использования по назначению.

Коэффициент оперативной готовности является удобной характеристикой для объектов, которые предназначены для длительного функционирования, а решают поставленную задачу в течение короткого промежутка времени (находятся в ждущем режиме), например, релейная защита, сложная контрольная аппаратура и т.д.

Коэффициент технического использования (в области надежности в технике) – доля времени нахождения изделия в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации в заданном интервале времени, включая все виды технического обслуживания.

$$K_{T\ И} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{m} \tau_{в\ i} + \sum_{j=1}^{k} \tau_j}, \tag{1.30}$$

где t_i – время сохранения работоспособности в i-м цикле функционирования объекта; $\tau_{вi}$ – время восстановления (ремонта) после i-го отказа объекта; τ_j – длительность выполнения j-й профилактики, требующей вывода объекта из работающего состояния (использования по назначению); n – число рабочих циклов за рассматриваемый период эксплуатации; m – число отказов (восстановлений) за рассматриваемый период; k – число профилактик, требующих отключения объекта в рассматриваемый период.

Как видно из выражения (1.30), коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей (календарной) продолжительности эксплуатации. Следовательно, $K_{ТИ}$ отличается от $K_Г$ тем, что при его определении учитывается все время вынужденных простоев, тогда как при определении $K_Г$ время простоя, связанное с проведением профилактических работ, не учитывается.

Коэффициент сохранения эффективности – отношение значения показателя эффективности применения изделия за определенный период эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы изделия в течение этого периода не произойдут.

$$K_{эф} = W_1 / W_H , \tag{1.31}$$

где W_1 – эффективность системы с учетом имеющихся отказов элементов, W_H – эффективность системы при отсутствии каких–либо отказов (номинальная эффективность).

В зависимости от назначения системы эффективность определяется по-разному. Например, для АСУ ТП тепловых и атомных энергоблоков эффективность может определяться мощностью энергии, вырабатываемой блоком за календарное время. Для банковской сети в качестве показателя эффективности может быть принята вероятность выполнения интегрированных платежных и информационных услуг по произвольному требованию.

1.6. Вопросы и задачи для самостоятельной подготовки

1. Чем отличается свойство долговечности от свойства безотказности?
2. Какие свойства надежности важнее для АСУ ТП?
3. Чем отличаются показатель интенсивности отказов от показателя частоты отказов? Какой из показателей информативней и почему?
4. По каким критериям можно классифицировать отказ? Есть ли количественные оценки?
5. Какие показатели долговечности являются наиболее распространенными на практике?
6. Рассчитайте среднюю наработку на отказ, если известно, что на испытания были поставлены 20 однотипных образцов изделий. Отказавшие изделия не заменялись. Время отказа каждого из изделий в часах:

   4 21 28 35 38 40 42 46 48 50 52 53 54 60 62 68 70 75 81 95
7. Для предыдущей задачи определите, чему равна ВБР изделия на 50 часу непрерывной работы.
8. Рассчитайте коэффициент готовности системы, если известно, что средняя наработка на отказ составляет 3000 ч, а ремонт системы занимает 120 ч.
9. Рассчитайте $К_{ТИ}$ системы, если известно, что средняя наработка на отказ составляет 3000 ч, а ремонт системы занимает 120 ч. В течение года общая продолжительность ППР, совмещенных с простоями системы составила 28 календарных дней.
10. Рассчитайте гамма-процентную наработку на отказ для системы для уровня γ=75% при известной наработке системы до отказа в 5000 ч. ВБР технической системы подчиняется экспоненциальному распределению.

2. РАСЧЕТЫ НАДЕЖНОСТИ. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Расчет надежности, согласно ГОСТ 27.301-95 «Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения», это процедура определения значений показателей надежности объекта с использованием методов, основанных на их вычислении по справочным данным о надежности элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчета.

Выбор метода расчета надежности системы зависит от ряда факторов [1]:

- этап разработки системы;
- характер отказов элементов в системе;
- вид закона распределений ВБР;
- режим работы элементов системы;
- восстанавливаемость объекта;
- способ анализа объекта;
- класс системы.

На этапе проектирования расчет проводится с целью прогнозирования (предсказания) ожидаемой надежности проектируемой системы. *Прогнозирование надежности* – частный случай расчета надежности объекта на основе статистических моделей, отражающих тенденции изменения надежности объектов-аналогов или экспертных оценок. Такое прогнозирование необходимо для обоснования предполагаемого проекта системы, а также для решения организационно-технических вопросов: выбора оптимального варианта структуры системы, способа резервирования, глубины и методов контроля, периодичности и объема профилактики, количества запасных частей и приборов, обоснования требований к надежности элементов системы.

На этапе проектирования выполняют ориентировочный расчет надежности, расчет норм надежности с точки зрения требований к надежности составных элементов и полный (окончательный) расчет надежности.

По виду отказов различают методы расчета надежности при внезапных и постепенных или перемежающихся отказах, при независимых и зависимых отказах.

По признаку восстановления объектов различают расчеты надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов.

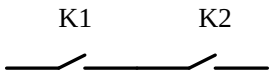
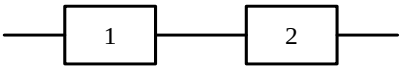
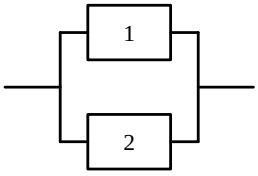
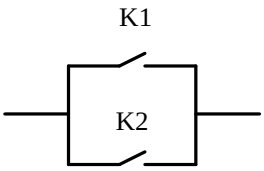
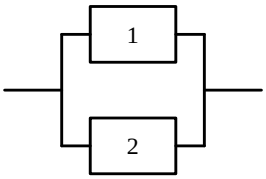
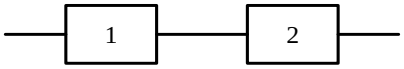
По способу анализа различают структурный и функциональный расчет надежности. При структурном расчете надежность системы определяется по показателям надежности отдельных элементов, составляющих систему, и разветвленностью связей между ними. Расчет функциональной надежности выполняется на основе анализа выполнения системой заданных функций. Этот вид расчета более сложен, так как необходимо учитывать множество дополнительных факторов: вид заданной функции, математическое и ПО, работу операторов, структурную надежность.

Следует помнить, что не всегда структурная схема надежности аналогична конструктивной или электрической схеме расположения элементов. Кроме того, на структуру схемы надежности может оказывать влияние и вид возникающих отказов. Например, в электрических системах для повышения надежности в ряде случаев применяют параллельное или последовательное соединение коммутирующих элементов, см. таблицу 2.1. Отказ таких изделий может происходить по двум причинам: обрыва (т.е. невозможности замыкания цепи) и замыкания (т.е. невозможности разрыва соединения). В случае отказа типа «обрыв» схема надежности соответствует электрической схеме системы: при “обрыве” любого коммутатора при последовательном их соединении возникает отказ, а при “обрыве” коммутатора в параллельном соединении все функции управления будет выполнять исправный коммутатор. В случае отказа типа “замыкание” схема надежности противоположна электрической: в парал-

лельном включении коммутаторов утратится возможность отключения тока, а в последовательном соединении коммутаторов общего отказа не происходит.

Таблица 2.1

Схемы соединения коммутационных элементов при различных отказах

Электрическая схема	Структурная схема надежности при отказе типа…	
	обрыв	замыкание
		
		

Обычно при расчете надежности используют аналитические методы, а также методы имитационного и статистического моделирования. Среди аналитических методов следует отметить логико-вероятностные методы, методы основанные на теории случайных процессов, декомпозиции, асимптотические и эвристические, аналитико-статистические [7]. Основой аналитических методов служит теория случайных марковских процессов.

2.1. Структурный расчет надежности систем без восстановления элементов

Самым простым видом расчета надежности считается расчет простых систем без резервирования, с независимо работающими элементами, без учета восстановления работоспособности с внезапными отказами при условии, что время работы до отказа распределено экспоненциально.

При структурном расчете надежности графически изображается структура надёжности рассматриваемой системы. Типовые виды соединений структурных схем:

- последовательное соединение;
- параллельное соединение;
- мостиковое соединение.

Пусть система состоит из n элементов, для которых заданными являются функции надёжности $p_i(t)$ и отказа $q_i(t)$, $i = \overline{(1, n)}$. Требуется определить вид функции надёжности исследуемой системы $p_C(t)$ и вычислить ее значения на интервале времени $t \in [0,\tau]$, а также определить среднее время безотказной работы.

2.1.1. Последовательное соединение элементов

Последовательное соединение элементов – это соединение, при котором отказ одного элемента приводит к отказу всей системы, рис. 2.1:

Рис. 2.1. Последовательное соединение элементов.

Функция надёжности такой системы вычисляется как:

$$p_C(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot \ldots \cdot p_n(t) \tag{2.1}$$

Функция отказа:

$$q_C(t) = 1 - \big(1 - q_1(t)\big) \cdot \big(1 - q_2(t)\big) \cdot \big(\ldots\big) \cdot \big(1 - q_n(t)\big) \tag{2.2}$$

Интегрируя формулу (1.7) для интенсивности отказов λ(t) легко получить:

$$p(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda\,(t)dt \right] \tag{2.3}$$

Выражение (2.3) называется *основным законом надёжности* и позволяет установить временное изменение вероятности безотказной *работы* при любом характере изменения интенсивности отказов. В частном случае постоянства интенсивности отказов λ(t)=const:

$$\begin{gathered} p(t) = \exp(-\lambda\, t); \quad и \quad q(t) = 1 - \exp(-\lambda\, t); \\ f\,(t) = -\frac{dp(t)}{dt} = \lambda \exp(-\lambda\, t) \end{gathered} \tag{2.4}$$

Полученный закон надёжности (2.4) называется *экспоненциальным* и имеет большое значение в теории надёжности. Экспоненциальный поток отказов при λ(t)=const реализуется для большинства систем в течение периода нормальной эксплуатации от окончания приработки до начала старения и износа. Для каждого i-го элемента, см. рис. 2.1, будет выполняться:

$$p_i(t) = \exp(-\lambda_i\, t) \qquad q_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i\, t); \tag{2.5}$$

Подставим формулу (2.5) в выражение (2.1) и получим:

$$p_C(t) = \exp(-\lambda_1 t) \cdot \exp(-\lambda_2 t) \cdot \ldots \cdot \exp(-\lambda_n t) = \exp\big[(-\lambda_1 - \lambda_2 - \ldots - \lambda_n)t\big] = \exp(-\lambda_C t)\,,$$

где $\lambda_C = \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n$ – интенсивность отказов системы с последовательным соединением.

Среднее время безотказной работы системы на рис. 2.1 для случая (2.4) будет равно:

$$T_C = \frac{1}{\lambda_C} \tag{2.6}$$

2.1.2. Параллельное соединение элементов

Параллельное соединение элементов, см. рис. 2.2, это такое соединение, при котором отказ системы возникает лишь при отказе всех её элементов. При этом функция отказов системы определяется как

$$q_C(t) = q_1(t) \cdot q_2(t) \cdot \ldots \cdot q_n(t) \tag{2.7}$$

Функция надёжности системы с параллельным соединением элементов:

$$p_C(t) = 1 - (1 - p_1(t)) \cdot (1 - p_2(t)) \cdot (\ldots) \cdot (1 - p_n(t)) \tag{2.8}$$

Среднее время безотказной работы системы с параллельным соединением вычисляется по общей формуле (1.14). В частном случае постоянства интенсивности отказов и равнонадежных элементах $\lambda_1 = \lambda_2 = \ldots = \lambda_n = \text{const}$:

$$T_C = \int_0^\infty P_C(t)dt = \int_0^\infty \left[1 - (1 - \exp(-\lambda t))^n\right]dt = \frac{1}{\lambda}\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \ldots + \frac{1}{n}\right) \tag{2.9}$$

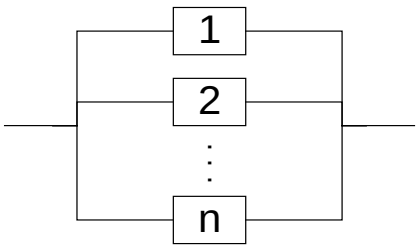


Рис. 2.2. Параллельное соединение элементов.

2.1.3. Мостиковое соединение элементов

Мостиковой структурой называют схему, представленную на рис. 2.3, состоящую из пяти элементов, один из элементов которой включен в диагональ. Диагональный элемент не позволяет считать, что остальные элементы соединены последовательно или параллельно. Поэтому использовать рассмотренный выше расчет надёжности для параллельно-последовательных структур, не представляется возможным.

Рассмотрим три метода расчета надёжности элементарных мостиковых структур. Первый метод разложения по базовому элементу.

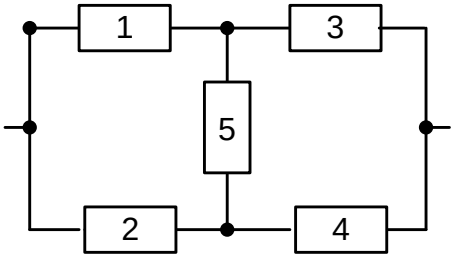
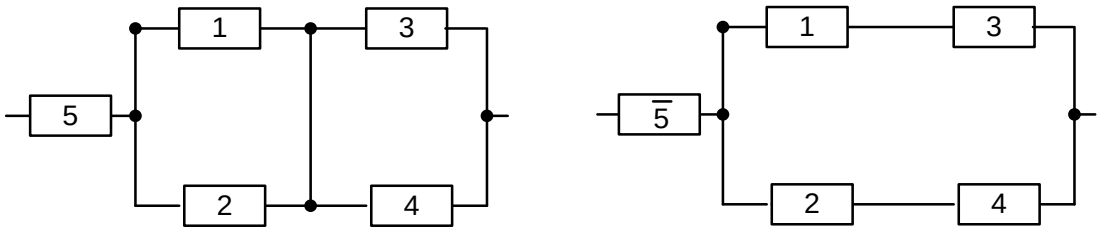


Рис. 2.3. Элементарная мостиковая структура

Метод *разложения по базовому элементу* основан на использовании теоремы о сумме вероятностей несовместных событий и заключается в следующем. В исходной структуре в соответствии с рис. 2.3 выбирается базовый элемент и предполагается два несовместных события: базовый элемент находится в работоспособном состоянии (рис. 2.4, а); базовый элемент находится в состоянии отказа (рис. 2.4, б). Для двух несовместных событий исходная элементарная мостиковая структура преобразовывается в две новые структурные схемы в соответствии с рис. 2.4, представляющие собой типовые параллельно-последовательные структуры.

При этом в качестве базового элемента целесообразно выбирать элемент, имеющий наибольшее количество связей, то есть диагональный элемент.



а б

Рис. 2.4. Структурные схемы надёжности с абсолютно надёжным (а) и абсолютно не надежным (б) базовым элементом «5»

На рис. 2.4, а базовый элемент «закорачивается», а на схеме рис. 2.4, б элемент размыкается. Вычисляются ВБР каждой из полученных схем и умножаются: первая $P_а$ на ВБР базового элемента, а вторая $P_б$ на вероятность отказа базового элемента. Полученные произведения складываются. Найденная сумма соответствует искомой ВБР исходной элементарной мостиковой структуры. Результирующая ВБР исходной мостиковой структуры $P_{МС}$ находится в соответствии с уравнениями:

$$P_{МС} = P_а + P_б \ ,$$

$$\begin{aligned} где\ P_а &= P_5\left(1-\left(1-P_1\right)\left(1-P_2\right)\right)\left(1-\left(1-P_3\right)\left(1-P_4\right)\right) \\ P_б &= Q_5\left(1-\left(1-P_1P_3\right)\left(1-P_2P_4\right)\right) \end{aligned} \qquad (2.10)$$

Второй метод расчета надёжности элементарной мостиковой структуры заключается в *преобразовании треугольника элементов в звезду*. Суть метода заключается в том, что узел сложной конфигурации структурной схемы заменяется на узел более подходящей конфигурации с сохранением показателей надёжности преобразуемого узла. При этом упрощается общая схема системы до последовательного и параллельного соединений.

Предположим, требуется заменить узел в виде треугольника состоящего из элементов a, b, c на рис. 2.5 на узел элементов в виде звезды ab, ac, bc. Используем условие: изменение структурной схемы не должно изменять надёжность цепей между точками 1-2, 2-3 и 3-1. Обозначим вероятность отказа элемента ab – q_{ab}, элемента bc – q_{bc} и элемента ac – q_{ac}.

Условия сохранения показателей надёжности рассматриваемых цепей математически выразятся следующими равенствами:

$$\begin{aligned} q_a+q_b-q_aq_b &= q_{ab}(q_{bc}+q_{ac}-q_{bc}q_{ac}), \\ q_b+q_c-q_bq_c &= q_{bc}(q_{ac}+q_{ab}-q_{ac}q_{ab}), \\ q_c+q_a-q_cq_a &= q_{ac}(q_{ab}+q_{bc}-q_{ab}q_{bc}) \end{aligned} \qquad (2.11)$$

Если пренебречь произведениями малых величин вида $q_i q_j$ в левой части и вида $q_{ij} q_{kl} q_{mn}$ в правой части уравнений (2.11), то получим упрощенную систему уравнений:

$$\begin{aligned} q_a + q_b &= q_{ab} q_{bc} + q_{ab} q_{ac}, \\ q_b + q_c &= q_{bc} q_{ac} + q_{bc} q_{ab}, \\ q_c + q_a &= q_{ac} q_{ab} + q_{ac} q_{bc} \end{aligned} \qquad (2.12)$$

Вычитая из одного уравнения (2.12) другое, складывая полученное с третьим уравнением, и действуя указанным образом по кругу, получим равенства (2.14). При обратном преобразовании звезды элементов в треугольник в соответствии с рис. 2.5 необходимо найти решение системы уравнений (2.12) относительно q_{ab}, q_{bc}, q_{ac}:

$$q_{ab} = q_a / q_{ac}\ , \qquad q_{bc} = q_b / q_{ab}\ , \qquad q_{ac} = q_c / q_{ac} \qquad (2.13)$$

Получаем три уравнения с тремя неизвестными. Путем подстановки несложно получить окончательные выражения при преобразовании звезды элементов в треугольник (2.15).

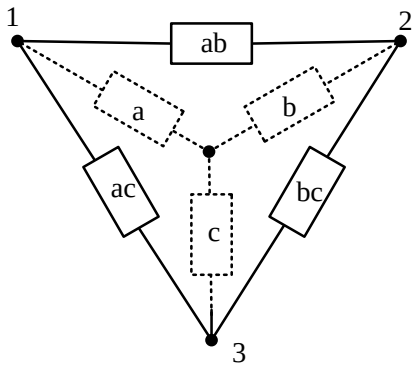


Рис. 2.5. Преобразование треугольника в звезду и обратно

$$\Delta \rightarrow Y:$$

$$q_a = q_{ab} q_{ac}\ , \quad q_b = q_{bc} q_{ab}\ , \quad q_c = q_{ac} q_{bc} \qquad (2.14)$$

$$Y \rightarrow \Delta:$$

$$q_{ab} = \sqrt{\frac{q_a q_b}{q_c}}$$

$$q_{bc} = \sqrt{\frac{q_b q_c}{q_a}} \quad q_{ac} = \sqrt{\frac{q_a q_c}{q_b}} \qquad (2.15)$$

У элементарной мостиковой структуры на рис. 2.6 элементы расчета надёжности 1, 2, 5 и 3, 4, 5 образуют две схемы соединения в треугольник. Преобразуем, например, соединение элементов 1, 2, 5 треугольник в звезду с элементами 12, 25 и 15 (новые несуществующие элементы изображены на рис. 2.6 пунктиром) в соответствии с формулами (2.14).

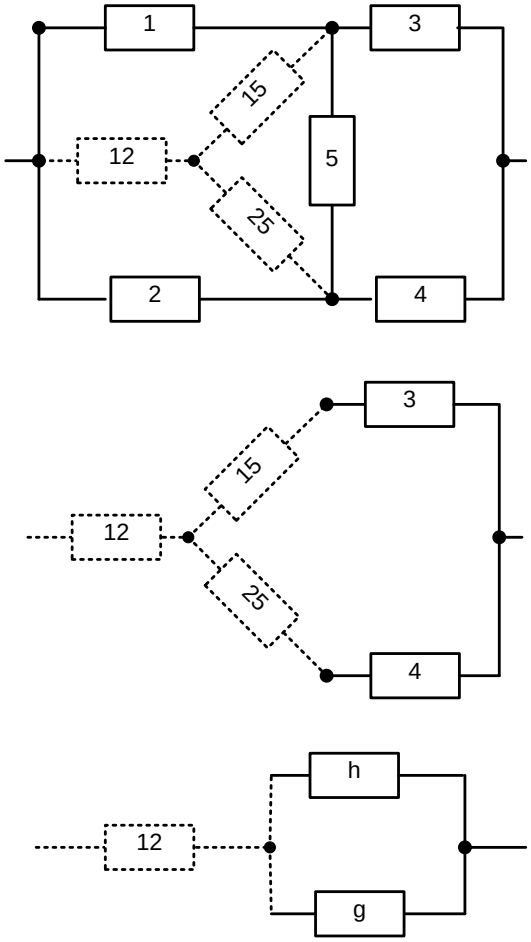


Рис. 2.6. Преобразование треугольника в звезду и дальнейшее упрощение

$$Q_{12} = Q_1 Q_2$$
$$Q_{25} = Q_2 Q_5$$
$$Q_{15} = Q_1 Q_5$$

Преобразуем полученные равенства в соотношения для ВБР по формуле $Q_{ij}=1 - P_{ij}$:

$$P_{12} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)$$
$$P_{25} = 1 - (1 - P_2)(1 - P_5)$$
$$P_{15} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_5)$$

Упростим мостиковую структуру в соответствии с рис. 2.6 для чего введем промежуточные элементы h, g. Результирующая ВБР элементарной мостиковой структуры:

$$P_H = P_{15} P_3$$

$$P_G = P_{25} P_4$$

$$P_{MC} = P_{12}\left[1 - (1 - P_H)(1 - P_G)\right]$$

Третий метод расчета надёжности элементарной мостиковой структуры заключается в *преобразовании звезды элементов в треугольник.*

У элементарной мостиковой структуры на рис. 2.7 элементы расчета надёжности 1, 3, 5, а также 2, 4, 5 образуют две схемы соединения звезда. Преобразуем, например, соединение элементов 1, 3, 5 в треугольник, используя ранее полученные выражения (2.15), предварительно преобразовав их в соотношения для ВБР:

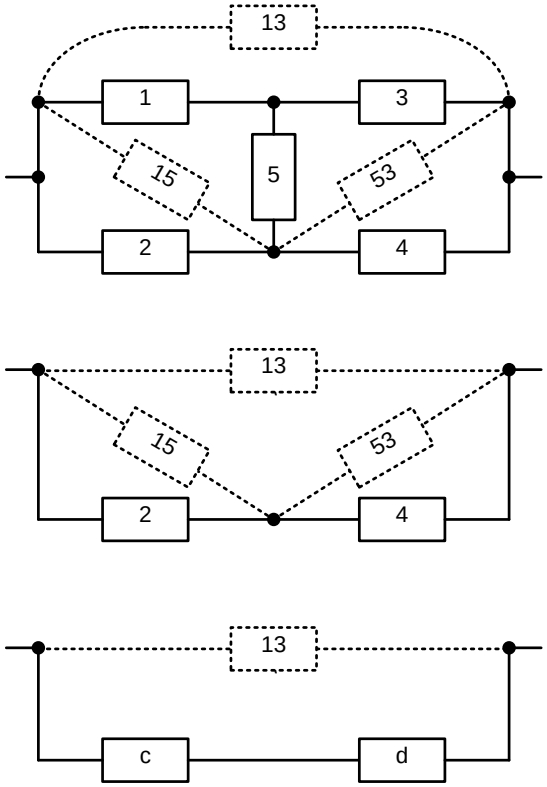


Рис. 2.7. Преобразование звезды в треугольник и дальнейшее упрощение

$$P_{13} = 1 - \sqrt{\frac{(1-P_1)(1-P_3)}{1-P_5}}$$

$$P_{53} = 1 - \sqrt{\frac{(1-P_3)(1-P_5)}{1-P_1}}$$

$$P_{15} = 1 - \sqrt{\frac{(1-P_5)(1-P_1)}{1-P_3}}$$

Упростим мостиковую структуру в соответствии с рис. 2.7 для чего введем промежуточные элементы c, d. Результирующая ВБР элементарной мостиковой структуры:

$$P_C = 1 - (1-P_{15})(1-P_2) = P_{15} + P_2 - P_{15}P_2$$

$$P_D = 1 - (1-P_{53})(1-P_4) = P_{53} + P_4 - P_{53}P_4$$

$$P_{MC} = 1 - (1-P_{13})(1-P_C P_D)$$

2.1.4. Учет влияния нагрузок при расчете надежности

При расчете надежности системы необходимо определить интенсивности отказов составляющих систему элементов. Определение интенсивности отказов элементов осуществляется путем обработки статистических данных по результатам испытаний и эксплуатации и, как правило, выбирается по справочным данным, например, таблица Б.1 приложения Б.

Для учета влияния климатических, производственных факторов вводят коэффициенты нагрузки K_H. *Коэффициент нагрузки* – отношение рабочего значения нагрузки к некоторому номинальному значению. Теоретически $0<K_H<\infty$. В некоторых случаях $K_H=0$ означает отсутствие данного вида нагрузки (например, электрической или вибрационной), а в других случаях соответствует номинальному значению нагрузки (например, тепловой).

Обозначим при отсутствии нагрузки $K_H=0$ интенсивность отказов элемента λ_0. Тогда интенсивность отказов элемента находящегося под нагрузкой $K_H \neq 0$ равна

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 + \frac{(hK_H)^2}{2!} + \frac{(hK_H)^3}{3!} + \ldots \right], \qquad (2.16)$$

где h – поправочный коэффициент нагрузки, см. таблицу Б.2 приложения Б.

При необходимости учета нескольких видов нагрузки и $hK_H << 1$ выражение (2.16) примет вид [9]:

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 + \sum_{i=1}^{s} \left(h_i K_{Hi} \right) \right], \tag{2.17}$$

где s – число учитываемых нагрузок.

При выборе величины K_H для электрической нагрузки следует учитывать влияние рассеиваемой мощности для транзисторов, резисторов, туннельных диодов, интегральных полупроводниковых схем; влияние напряжения – для конденсаторов; влияние силы прямого тока – для полупроводниковых диодов.

$$K_H = \frac{E_{Раб}}{E_{Ном}}, \tag{2.18}$$

где $E_{Раб}$, $E_{Ном}$ – рабочее и номинальное значения некоторого электрического параметра.

При расчете K_H для тепловой нагрузки следует вычислять отношение абсолютной разности между рабочей температурой $T_{Раб}$ и номинальным значением $T_{Ном}$=25 °С к номинальному значению:

$$K_H = \frac{\left| T_{Раб} - T_{Ном} \right|}{T_{Ном}} \tag{2.19}$$

При расчете вибрационной нагрузки следует вычислять отношение действующего ускорения $a_{Раб}$ к ускорению свободного падения g=9,81 м/с^2:

$$K_H = \frac{a_{Раб}}{g} \tag{2.20}$$

Другая методика учета внешней нагрузки использует *поправочные коэффициенты*. В этом случае табличная интенсивность отказов умножается на поправочный коэффициент, значение которого для разных условий эксплуатации приведены в таблице Б.3 приложения Б.

В результате специальных испытаний на надежность для некоторых базовых элементов получены расчетные графики, например, см. рис. 2.8 [9].

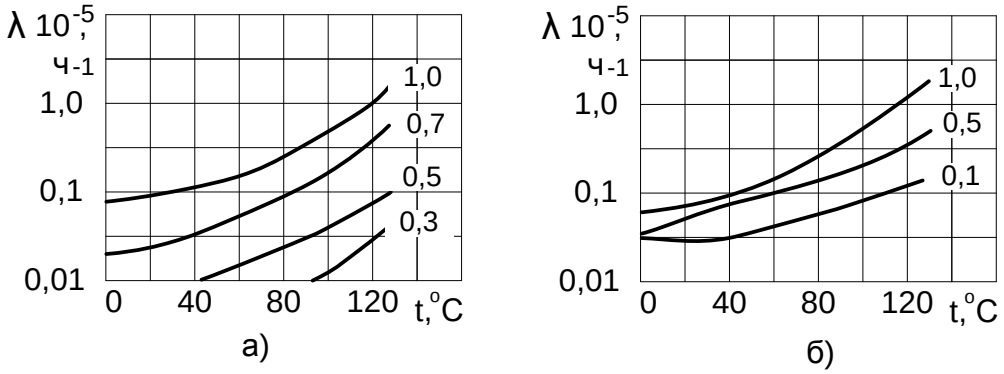


Рис. 2.8. Зависимость интенсивности отказов от температуры окружающей среды:
а) конденсаторов при разных K_H по напряжению,
б) резисторов при разных K_H рассеиваемой мощности

2.2. Расчет надежности систем с учетом восстановления элементов

Наиболее часто при расчетах надежности применяются метод интегральных уравнений и метод дифференциальных уравнений.

Метод интегральных уравнений основан на допущении, что значение времени (наработки) между последовательными отказами и времени восстановления являются независимыми случайными величинами. Составляются и решаются интегральные или интегро-дифференциальные уравнения, связывающие вероятности нахождения объекта в различных состояниях. При этом нет принципиальных ограничений на законы распределения времени (наработки) между отказами и времени восстановления элементов. Обычно сравнительно просто составить сами уравнения. Однако решение этих уравнений часто встречает большие трудности. Точные конечные результаты получены лишь для простых систем и некоторых законов распределения.

В *методе дифференциальных уравнений* использовано допущение об экспоненциальном распределении времени наработки между отказами и времени восстановления. По исходным данным об эксплуатации системы строится модель эксплуатации в виде графа (графической схемы) состояний и путей перехода из одного состояния в другое состояние. Развитие метода дифференциальных уравнений привело к формированию ряда правил определения функций вероятностей пребывания системы в определенном состоянии непосредственно по схеме состояний.

Перед составлением системы уравнений необходимо сосчитать количество возможных состояний системы и описать каждое состояние словесно. Например, система состоящая из одного элемента может находится в двух состояниях: первое состояние – элемент работоспособен, второе состояние – элемент неработоспособен (отказал). Затем составляется математическая модель в виде графа состояний, на котором прямоугольниками или кружками изображаются возможные состояния, а стрелками – направления переходов из одного состояния в другое на бесконечно малом отрезке времени, пример см. рис. 2.9. Неработоспособное состояние, как правило, заштриховывается или выделяется другим цветом.

При этом предполагается, что на бесконечно малом отрезке времени возможен только один переход, то есть, произойдет либо один отказ, либо одно восстановление. Также не следует забывать о возможности сохранения системой текущего состояния надежности.

Группа правил №1 составления системы дифференциальных уравнений (2.21):

1. Количество уравнений в системе равно количеству состояний.

2. В левые части уравнений записывают производные по времени вероятностей соответствующих состояний $dP_k(t)/dt$ или $\dot{P}_k(t)$.

3. Количество слагаемых правой части равно количеству стрелок (переходов) связанных с данным состоянием. Каждое слагаемое в правой части уравнения получается путем умножения интенсивности перехода $\lambda_{ij}(t)$ на вероятность того состояния, из которого направлена стрелка $P_i(t)$.

5. Знак каждого слагаемого в правой части зависит от направления стрелки: если стрелка направлена в рассматриваемое состояние, то ставим плюс; если стрелка направлена из рассматриваемого состояния, то ставим минус.

6. Для решения полученную систему дифференциальных уравнений дополняют условием: сумма вероятностей всех состояний равна единице $P_1(t)+P_2(t)+...+P_n(t)=1$.

7. Решение системы дифференциальных уравнений обычно получают с помощью преобразований Лапласа при условии, что в начальный момент времени все элементы системы работоспособны.

Например, для графа переходов на рис. 2.9 по правилам (2.21) система уравнений примет следующий вид:

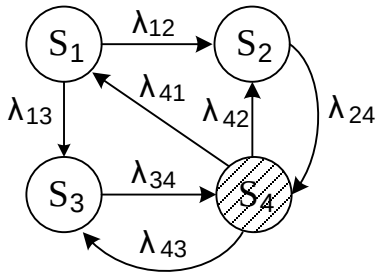


Рис. 2.9. Граф состояний системы

$$\begin{cases} \dot{P}_1(t) = -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{41}P_4(t) \\ \dot{P}_2(t) = \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{42}P_4(t) \\ \dot{P}_3(t) = \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{43}P_4(t) \\ \dot{P}_4(t) = \lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{43}P_4(t) - \lambda_{41}P_4(t) + \lambda_{24}P_2(t) - \lambda_{42}P_4(t) \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1 \end{cases}$$

В отдельных случаях можно применить *дискретный метод расчета уравнений.* Данный метод основывается на допущении, что переходы системы из одного состояния в другое возможны лишь в строго определенные моменты времени t_1, t_2, t_3, ..., t_k , ..., t_m, где k – целые числа от 1 до m; $t_k = k*\Delta t$.

Вероятность перехода системы из одного состояния в другое p_{ij} за промежуток времени Δt пропорциональна продолжительности этого промежутка и интенсивности перехода λ_{ij}, то есть $\Delta p_{ij} = \Delta t*\lambda_{ij}$. Если интервал времени Δt постоянен для одного расчета и функция надежности подчиняется экспоненциальному закону λ_{ij} =const, то вероятности нахождения системы в различных состояниях постепенно придут к установившимся значениям.

Для дискретного расчета необходимо выбрать шаг дискретизации по времени, например $\Delta t=1$. В этом случае вероятность перехода из одного состояния в другое $\Delta p_{ij} = \lambda_{ij}$. При неизменных интервалах времени (шаге дискретизации) для экспоненциального закона постепенно наступает установившийся режим.

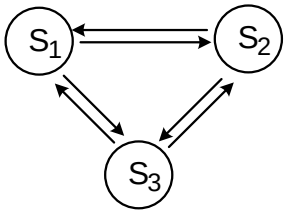


Рис. 2.10. Граф состояний системы

Например, граф переходов системы представлен на рис. 2.10 и известны интенсивности некоторых переходов:

$\lambda 12 = 0{,}3$; $\lambda 21 = 0{,}1$;
$\lambda 23 = 0{,}3$; $\lambda 32 = 0{,}1$;
$\lambda 13 = 0{,}1$; $\lambda 31 = 0{,}5$.

Составим матрицу переходов системы из одного состояния в другое. Так как система может находится в одном из трех состояний, то строим матрицу 3x3. Интенсивности переходов не указанные в таблице заполняем таким образом, чтобы сумма по строкам и по столбцам составляла единицу. Интенсивность λ_{11} обозначает, что существует вероятность того, что в дискретный момент времени t_k система останется в том же состоянии S_1.

$$L_{ij} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & 0.3 & 0.3 \\ 0.1 & L_{22} & 0.3 \\ 0.5 & 0.1 & L_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0.5 & 0.1 & 0.4 \end{pmatrix}$$

Зададимся начальными условиями. Предположим, что при t_0 система находилась в третьем состоянии. Матрица вероятностей нахождения системы в начальный момент времени $P_0 = (0\ 0\ 1)$.

Через промежуток времени Δt на первом шаге дискретного расчета t_1 матрица вероятностей нахождения системы в состояниях определится как

$$P_1 = P_0 \cdot L_{ij} \tag{2.22}$$

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0.5 & 0.1 & 0.4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.1 & 0.4 \end{pmatrix}$$

На втором шаге дискретного расчета t_2 матрица вероятностей нахождения системы в состояниях определится как $P_2 = P_1 \cdot L_{ij} = P_0 \cdot L_{ij}^2$ и так далее:

$$P_2 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.1 & 0.4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0.5 & 0.1 & 0.4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.41 & 0.25 & 0.34 \end{pmatrix}$$

$$P_3 = \begin{pmatrix} 0.41 & 0.25 & 0.34 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0.5 & 0.1 & 0.4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.36 & 0.31 & 0.33 \end{pmatrix}$$

На третьем шаге вероятность нахождения системы в S_1 равна 0.36, S_2 – 0,31 и в S_3 – 0,33. В общем виде распределение вероятностей на k -шаге рассчитывается:

$$P_k = P_0 \cdot L_{ij}^k \tag{2.23}$$

На рис. 2.11 представлены вероятности $P_1(t_k)$, $P_2(t_k)$, $P_3(t_k)$ при $0 \le k \le 10$:

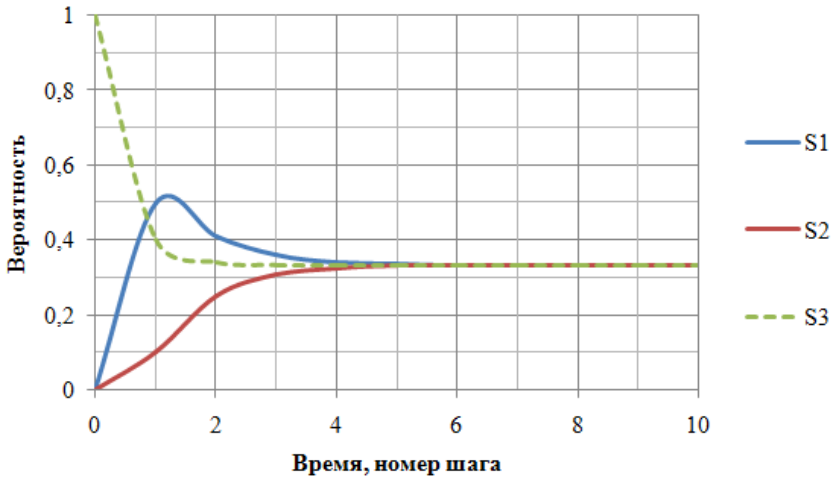


Рис. 2.11. Вероятности $P_1(t_k)$, $P_2(t_k)$, $P_3(t_k)$ при $0 \le k \le 10$ системы

2.2.1. Нерезервированные системы

Если перерывы в работе системы допустимы, в качестве показателей надежности обычно используют функцию $K_Г(t)$ или коэффициент готовности $K_Г$, см. раздел 1.5. Для упрощений часто рассматривают установившийся режим эксплуатации системы при $t \to \infty$. В установившемся режиме все переходные процессы окончены, а значит производные вероятностей $\dot{P}_k(t) = 0$. В этом случае во всех уравнениях системы, составленной по правилам №1 (2.21) в левых частях будет ноль и система дифференциальных уравнений становится системой алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_{12}P_1 - \lambda_{13}P_1 + \lambda_{41}P_4 \\ 0 = \lambda_{12}P_1 - \lambda_{24}P_2 + \lambda_{42}P_4 \\ 0 = \lambda_{13}P_1 - \lambda_{34}P_3 + \lambda_{43}P_4 \\ 0 = \lambda_{34}P_3 - \lambda_{43}P_4 - \lambda_{41}P_4 + \lambda_{24}P_2 - \lambda_{42}P_4 \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 \end{cases} \qquad (2.24)$$

Коэффициент готовности $K_Г$ равен сумме вероятностей нахождения системы в работоспособных состояниях. Для примера рис. 2.9 состояние S_4 – нерабочее, поэтому четвертое уравнение можно не решать. Вместо него можно использовать пятое уравнение. Получаем четыре уравнения и четыре неизвестных:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_{12}P_1 - \lambda_{13}P_1 + \lambda_{41}P_4 \\ 0 = \lambda_{12}P_1 - \lambda_{24}P_2 + \lambda_{42}P_4 \\ 0 = \lambda_{13}P_1 - \lambda_{34}P_3 + \lambda_{43}P_4 \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 \end{cases} \quad и \quad K_Г = P_1 + P_2 + P_3 \qquad (2.25)$$

Сформулируем *группу правил №2 составления системы для расчета* $K_Г$ (2.25):

1. Составить систему уравнений по правилам №1 (2.21).
2. В левых частях уравнений написать ноль. Выполнить замену $P_i(t)$ на P_i.
3. Убрать уравнение с нерабочим состоянием.
4. Кг определить как сумму вероятностей работоспособных состояний $K_Г = \sum_{i=1}^{k} P_i(t)$.

Пример. Простая система состоит из одного элемента. В начальный момент времени этот элемент работоспособен, см. рис. 2.12. Нерезервированная система может находиться в любой момент времени t в одном из двух состояний:

S_0 – система работоспособна;

S_1 – система неработоспособна, и значит, находится в ремонте.

Обозначим вероятность этих состояний через $P_0(t)$ и $P_1(t)$. Переход из состояния S_0 в S_1 это отказ элемента, поэтому интенсивность перехода λ_{01} обозначим просто λ. Переход из состояния S_1 в S_0 это восстановление элемента, поэтому интенсивность перехода λ_{10} обозначим μ.

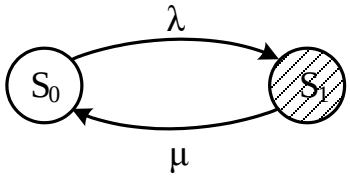


Рис. 2.12. Схема состояний нерезервированной системы:
над стрелками интенсивности перехода

Сначала составим систему дифференциальных уравнений по правилу №1:

$$\begin{cases} \dot{P}_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ \dot{P}_1(t) = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t) \\ P_0(t) + P_1(t) = 1 \end{cases} \qquad (2.26)$$

Рассмотрим случай, когда время безотказной работы и время восстановления имеют экспоненциальные распределения. Если при $t = 0$ система находилась в работоспособном состоянии, то начальные условия $P_0(0) = 1$, $P_1(0) = 0$. Для решения системы дифференциальных уравнений (2.26) произведем переход к изображениям по Лапласу: $P_i(t)$ заменим на $p_i(z)$, а $\dot{P}_i(t)$ заменим на $zp_i(z) - P_i(0)$, где z – преобразователь Лапласа:

$$\begin{cases} zp_0(z) - 1 = -\lambda p_0(z) + \mu p_1(z) \\ zp_1(z) - 0 = \lambda p_0(z) - \mu p_1(z) \end{cases} \qquad (2.27)$$

Решим систему уравнений и определим P_0(t):

$$p_1(z) = \frac{z+\mu}{z(z+\lambda+\mu)} = \frac{1}{z}\frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu}\frac{1}{z+\lambda+\mu} \qquad (2.28)$$

Преобразуем выражение (2.28) к виду, удобному для обратного преобразования Лапласа с помощью таблиц преобразований и определим:

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu}\exp[-(\lambda+\mu)t] \qquad (2.29)$$

Так как работоспособное состояние только одно, то функция коэффициента готовности $K_Г(t) = P_0(t)$, функция коэффициента простоя $K_П(t) = P_1(t)$.

При длительной эксплуатации $t \to \infty$ могут быть достигнуты установившиеся значения функции коэффициента готовности $K_Г = P_0$, что видно по уравнению (2.29) состоящему из постоянной и убывающей по экспоненте с течением времени частей.

При длительной эксплуатации $t \to \infty$ получаем стационарное значение коэффициента готовности $K_Г(t) \to K_Г = \text{const}$, не зависящее от начальных условий. Коэффициент готовности зависит лишь от соотношения $\rho = \lambda/\mu$:

$$K_Г = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{\rho + 1} \qquad (2.30)$$

Чем больше величина ρ, тем меньше коэффициент готовности, а значит и надежность системы, см. график на рис. 2.13. Продолжительность переходного процесса зависит от интенсивности восстановления: чем больше μ, тем быстрее наступает установившийся режим. Сравните функции $K_Г(t)$ для одинаковых значений соотношений ρ=0,4/1=0,4 и ρ*=λ*/μ*= 1,2/3 =0,4 на рис. 2.13.

Графики представленные на рис. 2.13 характерны для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы при μ, λ = const. Для других видов распределений часто существует провал функции готовности на начальном участке, что объясняется режимом приработки системы. Причем, для более надежных систем глубина провала функции $K_Г(t)$ на начальном участке времени будет больше. Для снижения интенсивности отказов в начальный период эксплуатации необходимо более тщательно проводить технологические прогоны объектов и систем до ввода в работу [6].

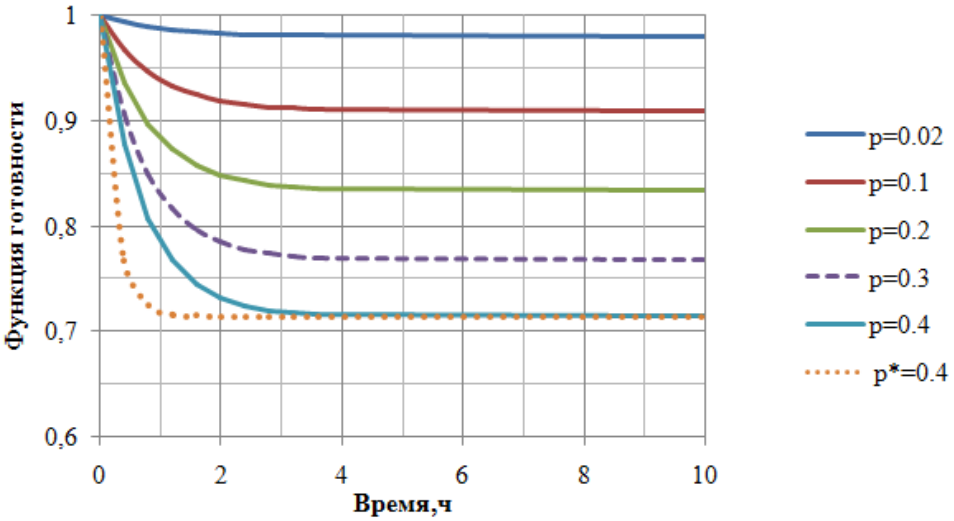


Рис. 2.13. Функция $K_Г(t)$ при различных значениях ρ=λ/μ для μ=1 $ч^{-1}$ и ρ* для μ*=3 $ч^{-1}$

Сложив все вероятности неработоспособных состояний системы можно определить коэффициент простоя $K_П$. Для системы представленной на рис. 2.12 $K_П = P_1$:

$$K_П(t) = P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu}\exp[-(\lambda + \mu)t] \qquad (2.31)$$

При длительной эксплуатации $t \to \infty$ стационарное значение коэффициента простоя:

$$K_{П}(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \qquad (2.\ 32)$$

Поскольку $\lambda = 1/T_0$, $\mu = 1/T_B$, то можно записать:

$$K_{Г} = \frac{T_0}{T_0 + T_B}, \quad K_{П} = \frac{T_B}{T_0 + T_B}, \qquad (2.33)$$

Пользуясь упрощениями дифференциальных уравнений в алгебраические, применимые для стационарного режима, можно определить наработку системы до отказа T_C.

Группа правил №3 составления системы для расчета T_C (2.34):

1. Составить систему уравнений по правилам №1 (2.21).

2. В уравнении начального состояния в левой части записать -1, в остальных уравнениях в левой части записать ноль. Выполнить замену $P_i(t)$ на T_i.

3. Убрать уравнение с нерабочим состоянием.

4. В правых частях уравнений убрать все слагаемые содержащие наработку в неработоспособных состояниях.

4. Решить систему уравнений, а T_C определить как сумму наработок в работоспособных состояниях $T_C = \sum_{i=1}^{k} T_i(t)$, где k – количество работоспособных состояний.

Для рассмотренного на рис. 2.12 примера есть лишь одно рабочее состояние S_0, поэтому остается только одно уравнение и наработка системы на отказ равна наработке системы в состоянии S_0:

$$-1 = -\lambda_{01} T_0 \qquad и \qquad T_C = T_0 = \frac{1}{\lambda_{01}} = \frac{1}{\lambda} \qquad (2.35)$$

Для понимания сути группы правил №3 расчета наработки системы представим уравнения для схемы на рис. 2.9 предполагая, что в начальный момент времени система находилась в первом состоянии:

$$\begin{cases} -1 = -\lambda_{12} T_1 - \lambda_{13} T_1 \\ 0 = \lambda_{12} T_1 - \lambda_{24} T_2 \\ 0 = \lambda_{13} T_1 - \lambda_{34} T_3 \end{cases} \qquad и \qquad T_C = T_1 + T_2 + T_3 \qquad (2.36)$$

2.2.2. Системы с нагруженным резервированием с восстановлением

В случае, если граф состояний системы представлен в виде рис. 2.14, что характерно для систем с нагруженным резервированием, то рассчитать вероятности нахождения системы в различных состояниях можно по формулам (2.37):

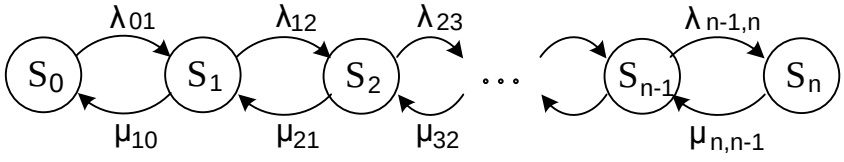


Рис. 2.14. Схема состояний системы

$$
\begin{cases}
P_0 = \dfrac{1}{1+\dfrac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}+\dfrac{\lambda_{01}\lambda_{12}}{\mu_{10}\mu_{21}}+\dfrac{\lambda_{01}\lambda_{12}\lambda_{23}}{\mu_{10}\mu_{21}\mu_{32}}+\ldots+\dfrac{\lambda_{01}\lambda_{12}\lambda_{23}\ldots\lambda_{n-1,n}}{\mu_{10}\mu_{21}\mu_{32}\ldots\mu_{n,n-1}}}, \\
P_1 = \dfrac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}P_0, \\
P_2 = \dfrac{\lambda_{12}}{\mu_{21}}P_1 = \dfrac{\lambda_{12}}{\mu_{21}}\dfrac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}P_0, \\
P_3 = \dfrac{\lambda_{23}}{\mu_{32}}P_2 = \dfrac{\lambda_{23}}{\mu_{32}}\dfrac{\lambda_{12}}{\mu_{21}}\dfrac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}P_0, \\
\ldots \\
P_n = \dfrac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}\dfrac{\lambda_{12}}{\mu_{21}}\dfrac{\lambda_{23}}{\mu_{32}}\ldots\dfrac{\lambda_{n-2,n-1}}{\mu_{n-1,n-2}}\dfrac{\lambda_{n-1,n}}{\mu_{n,n-1}}P_0.
\end{cases}
\qquad (2.37)
$$

2.2.3. Расчет систем по схеме с одним и двумя отказами

При составлении графических схем надежности с учетом всех возможных неисправностей и отказов получается очень большое количество состояний, что затрудняет расчеты. В случае, если система состоит из высоконадежных элементов можно использовать допущение, позволяющее существенно сократить количество состояний на графе.

Предлагаемое допущение заключается в рассмотрении только тех состояний при которых возможен только один отказ. Графическая схема системы получаемая с помощью данного допущения называется "схемой с одним отказом". В этом случае система состоящая из n-элементов может находится в n+1 состояний системы, рис. 2.15. Одно из состояний соответствует работоспособности всех элементов, остальные состояния соответствуют случаям неработоспособности одного из n-элементов при работоспособных других n-1 элементах. Доли времени нахождения в других состояниях, кроме указанных, считаются пренебрежимо малыми [6].

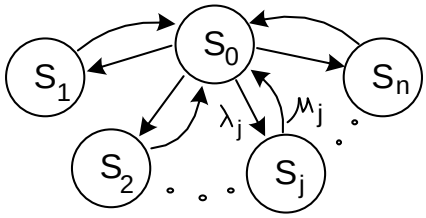


Рис. 2.15. Граф системы: *S0* – все элементы работоспособны,
Sj – отказал элемент *j, j=1..n*

Вероятность p_0 вычисляется по значениям коэффициентов готовности $k_Г$ всех j=1..n элементов или значениям соответствующих интенсивностей отказов λ_j, интенсивностей восстановлений μ_j элементов. При схеме одного отказа вычисляются вероятности нахождения системы в каждом из n+1 состояний:

$$
P_0 = \frac{1}{1+\sum_{j=1}^{n}\dfrac{\lambda_j}{\mu_j}} \qquad (2.38)
$$

$$P_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j} p_0 = \frac{\lambda_j}{\mu_j} \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^{n} \frac{\lambda_j}{\mu_j}}$$

Если использовать допущение о возможности лишь одного отказа в системе не возможно из-за низкой точности расчета, следует использовать "схему двух отказов". Допущение "схемы с двумя отказами" заключается в возможности лишь таких состояний системы, при которых не более двух ее элементов неработоспособны. Общее число возможных состояний в этом случае равно n+1+ C_n^2. В случае равнонадежных элементов граф системы с двумя отказами выглядит следующим образом:

При "схеме с двумя отказами" система может находиться в одном из трех несовместимых состояний, рис. 2.16. Вероятности появления трех и более отказов элементов по условию пренебрежимо малы. Интенсивность переходов из состояния S_0 в состояние S_1 равна nλ, из состояния S_1 в состояние S_2 равна (n-1)λ. Предположив наличие двух ремонтных бригад, имеем интенсивность переходов из состояния S_2 в состояние S_1, равную 2μ, а из состояния S_1 в состояние S_0 – равную μ.

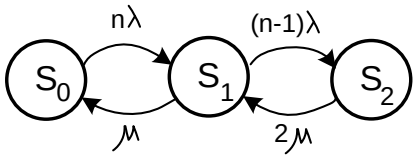


Рис. 2.16. Граф системы по схеме с двумя отказами: *S0* – все элементы работоспособны; *S1* – один из *n* элементов отказал, остальные *n-1* работоспособны; *S2* – два из *n* элементов отказали, остальные *n-2* работоспособны

При этих условиях стационарная вероятность нахождения в состояниях S_0 и S_2 в соответствии с (2.37) равна:

$$P_0 = \frac{1}{\frac{n(n-1)}{2}(\frac{\lambda}{\mu})^2 + \frac{n\lambda}{\mu} + 1}$$

$$P_1 = n\frac{\lambda}{\mu} P_0 = \frac{n\frac{\lambda}{\mu}}{\frac{n(n-1)}{2}(\frac{\lambda}{\mu})^2 + \frac{n\lambda}{\mu} + 1} \qquad (2.39)$$

$$P_2 = P_0 \frac{n(n-1)}{2}(\frac{\lambda}{\mu})^2 = \frac{\frac{n(n-1)}{2}(\frac{\lambda}{\mu})^2}{\frac{n(n-1)}{2}(\frac{\lambda}{\mu})^2 + \frac{n\lambda}{\mu} + 1}$$

Учтем, что обычно величина λ_j/μ_j <0.01 и количество выделяемых анализом элементов системы обычно невелико. При этом можно считать, что величина второй суммы в формуле (2.39) пренебрежимо мала.

2.3. Расчет показателей надежности по результатам испытаний

2.3.1 Основные определения и классификация испытаний на надежность

Испытания на надежность могут давать наиболее полные и достоверные данные о надежности объектов по сравнению с другими источниками информации. Испытания на надежность объектов, как правило, проводятся в течение длительного интервала времени и требуют значительных материальных затрат. Оценки надежности носят вероятностный характер, поэтому для повышения их достоверности надо испытывать большое количество объектов, что ведет к повышению стоимости эксперимента. В процессе испытаний изделия могут изнашиваться и становиться непригодными для дальнейшего использования.

Испытание это определение одной или нескольких характеристик согласно установленной процедуре [ГОСТ Р ИСО 9000-2008].

Определительное испытание – испытание, предназначенное для установления значения характеристики.

Контрольное испытание – испытание, предназначенное для проверки соответствия характеристики заданным требованиям.

Приемочное испытание – испытание, проводимое для подтверждения того, что изделие удовлетворяет установленным требованиям.

Квалификационное испытание – испытание нового или измененного изделия с целью проверки соответствия установленным требованиям.

Лабораторное испытание – испытание, проводимое в предписанных или регулируемых условиях, которые могут совпадать или не совпадать с эксплуатационными условиями.

Эксплуатационное испытание – испытание, проводимое при пользовательских условиях эксплуатации.

Испытание на усталостную прочность – испытание, проводимое с целью исследования влияния на изделие продолжительности и цикличности определенных нагрузок.

Форсированное испытание – испытание, в котором применяемые уровни нагрузок выбирают превосходящими эксплуатационные уровни нагрузок с целью сокращения времени, необходимого для наблюдения за поведением изделия.

Испытание ступенчатым нагружением – испытание, в котором прикладываемые уровни нагрузок прогрессивно увеличивают в определенные моменты времени до достижения установленного уровня или до наступления отказа.

Отбраковочное испытание – испытание или серия испытаний, предназначенные для обнаружения дефектных изделий или изделий, у которых следует ожидать появление ранних отказов.

Испытательный цикл – последовательность определенных эксплуатационных действий, технического обслуживания и условий окружающей среды, периодически повторяющихся во время испытаний.

Испытание на долговечность – испытание, проводимое с целью оценки или проверки долговечности.

Контролируемость – степень глубины в соответствии с уровнями разукрупнения, до которой может быть проверено изделие.

План испытаний – совокупность правил продолжения или завершения испытаний в зависимости от суммарной наработки испытуемых изделий или от суммарного числа наблюдений и числа отказов, произошедших к данному моменту времени испытаний.

План испытаний устанавливают порядок выборки, порядок проведения испытаний и порядок их прекращения. Наименование плана принято обозначать тремя буквами:

- первая буква обозначает число испытуемых систем;
- вторая буква обозначает наличие *R* (return) или отсутствие *U* восстановлений за время испытаний в случае отказа;

- третья буква обозначает критерий прекращения испытаний.

Например, план *NUN* обозначает, что испытываются *N* объектов без восстановления в течение времени, пока не откажут все *N* объектов. План *NUT*: испытываются *N* объектов без восстановления в течение времени *T*. План *NUr*: испытывается *N* объектов без восстановления до тех пор, пока не произойдет *r* отказов.

План *NRT*: испытывается *N* объектов с восстановлением элементов в течение времени *T*. План *NRr*: испытывается *N* объектов с восстановлением до тех пор, пока не произойдет *r* отказов.

По *характеру получаемых оценок* испытания могут давать *усредненные значения* показателей надежности (точечная оценка) и *интервальные значения* показателей надежности с заданной доверительной вероятностью.

Статистические определения показателей надежности, приводимые в разделе 2, являются точечными (усредненными) оценками. Усредненные показатели обычно дают достаточные для практических целей представления о надежности изделий, особенно тогда, когда требуется сравнение изделий или конструктивных вариантов.

Более подробную информацию о надежности можно получить по доверительному интервалу – интервалу возможных значений показателя надежности, в который попадает определяемый показатель надежности с заданной (доверительной) вероятностью.

По *способу получения исходных данных* определительные испытания могут быть:

- *прямыми,* то есть основываться на информации об отказах объектов;
- *косвенными,* то есть признаками назревающих отказов может быть избыточное выделение тепла, изменение токов, выходящих за допустимые пределы, и т.п. По этим косвенным признакам можно прогнозировать наступление отказов и определять прогнозируемые показатели надежности.

При использовании варианта накопления исходной информации – информация о надежности собирается из разных источников.

По *методу получения результатов* испытания делят на:

- *экспериментально-статистические*;
- *расчетно-экспериментальные.*

Следует помнить, что испытаниям на надежность подвергаются устройства и системы, предварительно проверенные на функционирование. При испытаниях АСУ на надежность по времени проведения испытаний выделяют следующие этапы:

1) испытания аппаратуры и ее элементов с целью получения информации о надежности отдельных элементов системы;

2) испытания аппаратурных КТС и системы в целом с использованием информации о надежности аппаратуры;

3) уточнение оценки надежности АСУ по результатам подконтрольной эксплуатации.

Одной из главных задач испытаний системы на любом из этапов является задача анализа причин, которые могут привести к снижению надежности.

2.3.2. Точечные оценки показателей безотказности и ремонтопригодности

Точечными оценками показателей надежности (ПН) называют средние статистические определения ПН, см. п. 1.2. Усредненные показатели обычно дают достаточные для практических целей представления о надежности изделий, особенно, если требуется сравнение нескольких элементов или конструктивных вариантов.

При испытаниях по плану *NUN* средняя наработка на отказ $T_{ср}$ рассчитывается как среднее арифметическое наработок t_i до отказа *N* однотипных элементов:

$$T_{ср} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} t_i \qquad (2.40)$$

При числе N более и равном 8 значения наработки до отказа t_i подчиняющихся экспоненциальному распределению. В этом случае распределение случайной величины оценки $T_{ср}$ с достаточной точностью подчиняется нормальному распределению. Оценка среднеквадратического отклонения $\sigma_{ср}(T_{ср})$ относительно его среднего значения равна:

$$\sigma_{cp}\left(T_{cp}\right)=\frac{\sigma(t)}{\sqrt{N}}=\sqrt{\left(\frac{1}{(N-1)N}\times\sum_{i=1}^{N}(t_i-T_{cp})^2\right)} \tag{2.41}$$

Из (2.41) выразим N:

$$\sqrt{N}=\frac{\sigma(t)}{\sigma_{cp}\left(T_{cp}\right)}$$

Для экспоненциального распределения известно, что среднеквадратическое отклонение равно математическому ожиданию, то есть $\sigma(t) = T_{ср}$. Значит, чтобы определить требуемое число элементов поставленных на испытания N [6]:

$$\sqrt{N}=\frac{T_{cp}}{\sigma_{cp}\left(T_{cp}\right)}\ \Rightarrow N=\left(\frac{T_{cp}}{\sigma_{cp}\left(T_{cp}\right)}\right)^2 \tag{2.42}$$

Пример. Определить число изделий N, которые необходимо поставить на испытания NUN при условии, что допустимая ошибка в определении наработки на отказ равна 10% от $T_{ср}$ с доверительной вероятностью 0,96. Предполагаемая средняя наработка на отказ $T_{ср}$ составляет 3000 ч.

Решение. Для указанной наработки погрешность в 10% соответствует 10*3000/100% = 300 ч. При нормальном распределении искомой оценки $T_{ср}$ доверительная вероятность $P_д$ = 0,96 соответствует отклонению $2\sigma_{ср}(T_0)$. Поэтому $2\sigma_{cp}\left(T_{cp}\right)=300\ \Rightarrow\sigma_{cp}\left(T_{cp}\right)=150$

По (2.42) определим количество требуемых элементов:

$$N=\left(\frac{3000}{150}\right)^2=200$$

Для экспоненциального распределения времени безотказной работы системы при всех других планах испытаний точечная оценка средней наработки до отказа определяется [1]:

$$T_{cp}=\frac{T_\Sigma}{r} \tag{2.43}$$

где T_Σ – суммарная наработка всех элементов за время испытаний, r – суммарное число отказов элементов за время испытаний, n – общее количество элементов.

Суммарная наработка по плану без замены элементов вычисляется по формуле:

$$T_\Sigma=\sum_{i=1}^{r}t_i+(n-r)t_r \tag{2.44}$$

Суммарная наработка по плану с заменой элементов:

$$T_\Sigma=nt_r \tag{2.45}$$

2.3.3. Оценка показателей надежности доверительным интервалом

Более подробную информацию о надежности можно получить по доверительному интервалу – интервалу значений показателя надежности, в который попадает определяемый ПН с заданной вероятностью.

Чем меньше число испытаний *N*, тем больше расхождение между истинным значением наработки на отказ и средним статистическим, рассчитанным по (2.40). Найти точные границы, в пределах которых находится истинное значение искомой величины, не представляется возможным. Однако можно указать двухстороннюю доверительную вероятность α, которая определяется следующим образом:

$$\alpha = P\,(T_н \le T_0 \le T_в) = 1 - P_д\,, \tag{2.46}$$

где $T_н$, $T_в$ – нижняя и верхняя граница доверительного интервала, T_0 – наработка на отказ.

Доверительный интервал может быть односторонним:

$$\alpha_1 = P\,(T_H \le T_o) \tag{2.47}$$

$$\alpha_2 = P\,(T_0 \le T_B)\,, \tag{2.48}$$

где α_1, α_2 – соответствующие односторонние доверительные вероятности событий: T_0 больше или равна нижней границе доверительного интервала $T_н$, T_0 меньше или равна верхней границе доверительного интервала $T_В$.

Определение доверительного интервала для средней наработки на отказ выполняется с указанием границ доверительного интервала для T_0 в соответствии с выражением:

$$\frac{2t_\Sigma}{\chi^2_B} < T_0 < \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_H}\,, \tag{2.49}$$

где $\chi^2{}_в, \chi^2_н$ – верхнее и нижнее значение распределения χ^2, полученное для заданной доверительной вероятности α, $2t_\Sigma$ – удвоенное значение суммарной наработки, поставленных на испытание изделий. Значения $T_н$ и $T_в$ – нижняя и верхняя границы средней наработки на отказ при двусторонней доверительной вероятности α определяются согласно так:

$$T_н = \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_в(k_н, \alpha_н)}\,, \tag{2.50}$$

$$T_в = \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_н(k_в, \alpha_в)}\,, \tag{2.51}$$

где $k_н=2r$ – число степеней свободы χ^2-распределения для определения $T_Н$; $\alpha_н = 1- \alpha/2$ – значение вероятности события: χ^2 меньше $\chi^2_в$, $k_в =2r$ число степеней свободы χ^2 -распределения для определения $T_В$; $\alpha_в = \alpha/2$ – значение вероятности события: χ^2 больше $\chi^2_н$.

Таблицу χ^2-распределения см. в приложении Б [6]. Также можно воспользоваться функцией "=ХИ2ОБР(α; k)" электронной таблицы Excel.

Перепишем (2.49) при учете двухсторонней вероятности:

$$\frac{2t_\Sigma}{\chi^2_{\alpha/2}} < T_0 < \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_{1-\alpha/2}}, \tag{2.52}$$

Для односторонней нижней границы:

$$T_0 > \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_\alpha} \tag{2.53}$$

Для определения доверительной границы наработки t_γ в течение которой ВБР будет больше заданного значения P_γ для двухстороннего интервала:

$$\frac{2t_\Sigma}{\chi^2_{\alpha/2}} \ln\frac{1}{P_\gamma} < t_\gamma < \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_{1-\alpha/2}} \ln\frac{1}{P_\gamma}, \tag{2.54}$$

для односторонней нижней границы:

$$t_\gamma > \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_\alpha} \ln\frac{1}{P_\gamma} \tag{2.55}$$

Если необходимо найти доверительные границы для ВБР в заданном интервале наработки $(0,t_1)$, то для двухстороннего интервала:

$$\exp\left(-\frac{t_1\chi^2_{\alpha/2}}{2t_\Sigma}\right) < P(t_1) < \exp\left(-\frac{t_1\chi^2_{1-\alpha/2}}{2t_\Sigma}\right), \tag{2.56}$$

для односторонней нижней границы:

$$P(t_1) > \frac{t_1\chi^2_\alpha}{2t_\Sigma} \tag{2.57}$$

Например, если на испытания по плану NRr поставлено 50 элементов. На 1020 ч испытаний произошел 15-й отказ и испытания было решено прекратить. Для определения средней наработки до отказа с доверительной вероятностью 0,9 воспользуемся таблицей с χ^2-распределением.

Условие задачи кратко запишем: N = 50, r = 15, t_r = 1020, $\alpha_в$ =1 - 0,9 = 0,1. По таблице для $\chi^2_н$ (2r, 1- α/2) = $\chi^2_н$ (30, 0,95) = 18,5, $\chi^2_В$ (2r, α/2) = $\chi^2_н$ (30, 0,05) = 43,8.

Суммарную наработку определим по (2.45): $T_\Sigma = nt_r = 50 \cdot 1020 = 51000$.

Точечная оценка средней наработки на отказ определится по (2.43):

$$T_{ср} = \frac{T_\Sigma}{r} = \frac{51000}{15} = 3400$$

Доверительный интервал средней наработки определим по (2.52):

$$\frac{2\cdot 51000}{43{,}8} < T_0 < \frac{2\cdot 51000}{18{,}5} \quad \Rightarrow \quad 2329 < T_0 < 5514$$

Для односторонней нижней границы по (2.53):

$$T_0 > \frac{2\cdot 51000}{40{,}3} \quad \Rightarrow \quad T_0 > 2530$$

В результате получили три варианта ответа:1) средняя наработка на отказ 3400 ч; 2) доверительный интервал средней наработки на отказ (2320, 5510) с доверительной вероятностью $P_д = 0{,}9$; 3) средняя наработка на отказ больше 2530 ч с вероятностью $P_д = 0{,}9$.

2.3.4 Контрольные испытания на надежность

Для проведения контрольных испытаний из совокупности (партии) однородных приборов составляется некоторая выборка и проводятся испытания на надежность попавших в эту выборку приборов. По результатам испытаний выборки делается вывод о соответствии всей партии предъявляемым требованиям. При этом используется метод математической статистики о проверки статистических гипотез.

В качестве нулевой (проверяемой) гипотезы принимаем предположение о том, что партия соответствует предъявляемым требованиям H_0. Противоположной является гипотеза о том, что партия не удовлетворяет этим требованиям. По результатам испытаний возникает одна из четырех возможных ситуаций, см. таблицу 2.5.

Гипотеза H_0 может не подтвердится потому, что случайная выборка содержала повышенную долю бракованных образцов по сравнению с долей образцов в партии. В этом случае принимается альтернативная гипотеза – H_1 о том, что вся партия бракованная, что является неправильным. Вероятность принятия этой ошибочной гипотезы обозначается – α и называется риском поставщика или риском первого рода решение, т.к. эта ситуация невыгодна для изготовителя (продавца) приборов.

Если же допускают к принятию партию с большой долей бракованных изделий, так как случайная выборка содержала лишь удачные образцы по сравнению со всей остальной партией, то такое неверное решение будет невыгодно потребителю. Вероятность этого события называется риском заказчика – β или риском второго рода.

Таблица 2.5

Возможные результаты контрольных испытаний

Партия	Партия удовлетворяет требованиям надежности		Партия не удовлетворяет требованиям надежности	
По результатам испытаний выборки:	гипотеза H_0 подтвердилась	гипотеза H_0 не подтвердилась	гипотеза H_0 не подтвердилась	гипотеза H_0 подтвердилась
Решение:	партия принята	партия бракуется	партия бракуется	партия принята
Итог:	правильное решение	вероятность принятия неправильного решения α	правильное решение	вероятность принятия неправильного решения β

Естественно желание снизить значения обеих ошибок, доведя их в пределе до нуля. Зависимость вероятности $P_{ПР}$ приемки партии от показателя надежности ПН называется

оперативной характеристикой плана контроля. Оперативная характеристика для ситуации, когда проверяется вся партия, приведена на рис. 2.17.

Если $X \geq X_{тр}$, то гипотеза H_0 подтверждена и партия принимается с вероятностью $P_{ПР} = 1$. При этом риск $\alpha = 0$.

Если $X < X_{тр}$, то гипотеза H_0 не подтверждена и партия бракуется с вероятностью 1, причем риск $\beta = 0$. Однако такая идеальная оперативная характеристика требует бесконечного числа наблюдений, проверки всех изделий в партии.

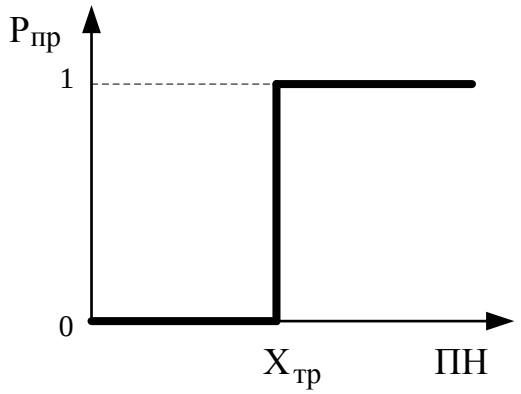


Рис.2.17. Идеальная оперативная характеристика плана контроля: Рпр – вероятность приемки партии, Хтр – требуемое значение показателя надежности

В реальной ситуации вводятся два уровня контролируемого показателя надежности: приемочный X_α и браковочный X_β , см. рис. 2.18. Если $X \geq X_\alpha$, то партия принимается с достаточно высокой вероятностью, не ниже $P(X_\alpha)$. При этом риск поставщика $\alpha = 1 - P(X_\alpha)$.

Если $X \leq X_\beta$, то партия бракуется с достаточно высокой вероятностью, не ниже $P(1 - X_\beta)$, риск потребителя $\beta = P(X_\beta)$. Обычно риск поставщика α и потребителя β выбирается равным 0,1…0,2. Значение браковочного A_β и приемочного уровня A_α ПН выбирается по договоренности между поставщиком и потребителем. В случае если $X_\beta < X < X_\alpha$, то испытания необходимо продолжать. Контрольные испытания на безотказность проводятся одноступенчатым или двухступенчатым методом.

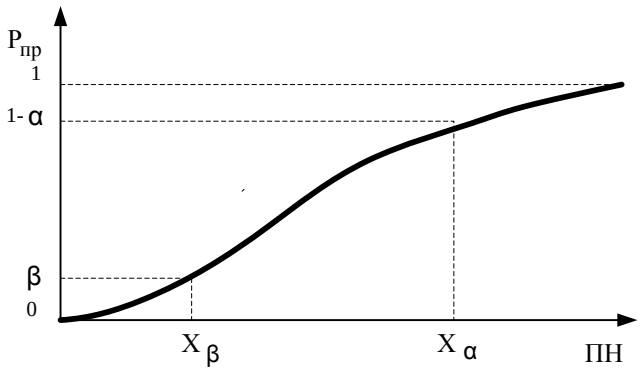
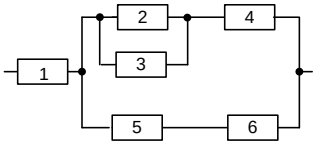


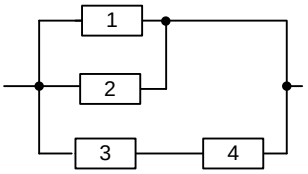
Рис.2.18. Реальная оперативная характеристика плана контроля:
$P_{ПР}$ – вероятность приемки партии, X_α, X_β – приемочный и браковочный ПН

2.4. Вопросы и задачи для самостоятельной подготовки

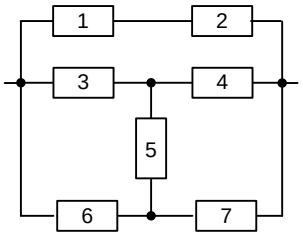
1. Рассчитать ВБР для схемы, если все элементы равнонадежны и ВО каждого из элементов равна 0,1.



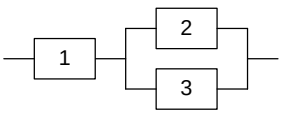
2. Рассчитать ВО для схемы, если все элементы равнонадежны и ВБР каждого из элементов равна 0,9.



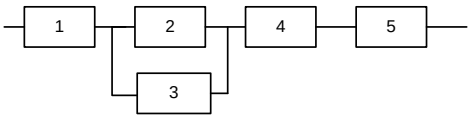
3. Рассчитать ВБР для схемы, если все элементы равнонадежны и надежность каждого из элементов равна 0,8.



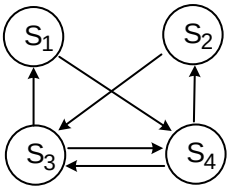
4. Определить среднюю наработку на отказ системы при условии, что восстановление не ограничено. Система состоит из трех равнонадежных элементов соединенных параллельно. Интенсивность отказов каждого элемента равна 0,01 $ч^{-1}$, интенсивность восстановления 1 $ч^{-1}$.
5. Чему равна наработка на отказ для предыдущей задачи, если элементы не восстанавливаются? Ответ пояснить.
6. Определить коэффициент готовности системы при наличии одной ремонтной бригады. Интенсивность отказов каждого элемента равна 0,005 $ч^{-1}$. Интенсивность восстановления 0,5 $ч^{-1}$. Структурная схема надежности системы приведена на рисунке:



или



7. Определить вероятность того, что на пятом шаге система находится в состоянии S4. Вероятности перехода из одного состояния в другое указаны в таблице. Система может и остаться в текущем состоянии. В начальный момент времени система находилась в четвертом состоянии.



L14	L42	L23	L34	L43	L31
0,6	0,3	0,3	0,2	0,5	0,6

8. Определить коэффициент готовности системы при условии, что восстановление не ограничено. Система состоит из трех равнонадежных элементов соединенных парал-

лельно. Интенсивность отказов каждого элемента равна 0,01 $ч^{-1}$, интенсивность восстановления 1 $ч^{-1}$.

9. Чему равен коэффициент готовности для задачи №8, если восстановление ограничено одной ремонтной бригадой? Ответ пояснить.
10. Чему равен коэффициент готовности для задачи №8, если элементы не восстанавливаются? Ответ пояснить.
11. Определить число изделий N, которые необходимо поставить на испытания по плану NUN чтобы определить среднюю наработку на отказ. Допустимая ошибка в определении наработки на отказ 5% с доверительной вероятностью 0,96. Предполагаемая средняя наработка на отказ $T_{ср}$ составляет 10000 ч.
12. На испытания были поставлены 16 изделий. Определить двухсторонний доверительный интервал наработки на отказ с Рдов=0,9. За время испытаний 350 ч было зафиксировано 10 отказов при условии: а) отказавшие элементы заменялись новыми; б) отказавшие элементы не заменялись.
13. При испытаниях объектов на надежность суммарная наработка до 10-го отказа включительно составляет 13000 ч. Можно ли с достоверностью 95% считать, что ВБР в течении 100 ч будет не менее 0,9?

3. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ, УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Выделим наиболее общие параметры, от которых зависит надежность системы. Рассмотрим методы обеспечения и повышения надежности системы в различные периоды реализации.

При проектировании и производстве системы необходимо:

- выбирать оптимальную структурную схему, уменьшая количество основных элементов;
- использовать более надежные элементы с меньшей интенсивностью отказов λ;
- вводить избыточность, резервировать элементы: кратность резервирования, вид и способ реализации резерва.

В процессе эксплуатации системы необходимо:

- повышать ремонтопригодность системы, интенсивность восстановления μ (увеличивать число ремонтных бригад, квалификацию персонала, пополнять склады запасных изделий и приборов);
- подобрать рациональную систему технического обслуживания (периодичность и глубина профилактических работ, диагностика);
- выбор оптимальных условий эксплуатации системы;
- сокращать время непрерывной работы системы [7].

3.1. Резервирование – способ повышения надежности на стадии проектирования

Резервирование – наличие в изделии больше одного средства, необходимого для выполнения требуемой функции; введение избыточности в систему. Избыточность обеспечивается с помощью дополнительных средств или возможностей.

При проектировании сложных систем, к которым без сомнения относятся АСУ, необходимо одновременно вводить избыточность различных видов для повышения безотказности и ремонтопригодности системы.

3.1.1. Классификация методов и видов резервирования

Основные виды резервирования: структурное, временное, информационное, функциональное, нагрузочное.

Функциональное резервирование – резервирование, при котором заданная функция может выполняться различными способами и техническими средствами. Например, функция передачи информации может выполняться по электрическим, оптоволоконным кабелям или по беспроводной связи. Или формирование управляющих воздействий в АСУ может осуществляться в автоматическом режиме, дистанционном, в режиме советчика. Эффективность работы объекта в основном и резервных режимах работы, как правило, существенно отличается. При таком способе резервирования надежность системы повышается за счет устранения последствий отказа перераспределением функций между элементами системы, как это делает живой организм.

Временное резервирование – такое планирование режима работы системы, при котором создается резерв рабочего времени для выполнения заданных функций. В этом случае у системы заранее создаются некоторые запасы продукта, ресурса, который система в случае отказа может некоторое время расходовать, выполняя свои функции и восстанавливать свои технические характеристики. Резерв времени может создаваться за счет уменьшения оперативного времени, отводимого на выполнение функции. Например, время цикла работы

контроллера выбирается заведомо больше необходимого времени, чтобы гарантировать работу в режиме реального времени даже при некоторых сбоях при вводе, выводе информации на объект или большом объеме обрабатываемой или передаваемой по интерфейсным каналам информации. Временное резервирование обеспечивается выбором более производительных (более быстрых) элементов и блоков нежели требуется для номинальных режимов.

Накопление запасов расходных материалов и энергии позволит продолжать выполнять заданные функции даже при отключении электроэнергии или прекращении подачи расходных материалов, водных или энергоресурсов. Для реализации необходимы аккумуляторные батареи, промежуточные бункеры, водохранилища, возможно, склады и т. д.

Для систем с резервом времени отказ системы наступит лишь тогда, когда после отказа неисправность не удается устранить за время, равное резерву времени. Допустим, для передачи информации заданного об**ъ**ема требуется время t. При планировании работы на эту операцию отводится время ($t+t_{РЕЗ}$), где $t_{РЕЗ}$ – резервное время. Резервное время может быть использовано либо для повторения задачи (например передачи одной и той же информации несколько раз), либо для устранения неисправности аппаратуры.

Информационное резервирование – введение избыточных символов при передаче, обработке и отображении информации. Примером создания информационного резервирования является, дублирование передаваемых данных (или просто многократная передача данных), увеличение разрядности помехоустойчивого кода, позволяющего бороться с помехами, сбоями. К категории информационной избыточности относятся различные средства кодирования информации с использованием дополнительных разрядов, например, коды Хемминга, циклические коды, способствующие не только обнаружению, но и устранению ошибок в передаче информации. Архивные, журнальные файлы, откаты в системах управления базами данных. Избыток информации позволяет частично или полностью скомпенсировать искажения в передаче данных.

Введение избыточности в алгоритмы обработки информации минимальной сложности: дублирование ввода данных, двойной просчет, контрольные тестовые точки.

Нагрузочное резервирование – введение избыточности по возможной нагрузке системы или объекта. Повышение надежности происходит за счет работы системы в более облегченном режиме, нежели указано в технической документации. Оптимальные запасы способности элементов выдерживать действующие на них нагрузки позволяют повысить надежность. Эксплуатация оборудования на предельных мощностях и возможностях всегда приводит к преждевременному износу и более частым отказам, снижая срок службы. К методам нагрузочного резервирования относят введение дополнительных защитных или разгружающих элементов.

В некоторых случаях нагрузочное резервирование не рассматривают как отдельный вид, а просто говорят о з*апасе по нагрузкам,* т.е. о применении элементов при значениях нагрузок ниже номинальных значений в целях повышения безотказности или о работе элементов в облегченных режимах.

Структурное резервирование – введение дополнительных избыточных элементов в систему для повышения надежности. Самый распространенный вид резервирования, так как достаточно прост в реализации и выгоднее на практике.

Различают следующие разновидности резервирования (в первую очередь речь идет о структурном резерве).

1) По способу соединения выделяют *общее, раздельное и смешанное резервирование,* см. рис. 3.1, а,б.

Смешанное резервирование – Резервирование, обеспечивающее выполнение требуемой функции несколькими различными средствами и (или) способами.

2) По способу включения резерва выделяют *постоянно включенный и динамический резерв* с тремя подвидами: замещением, скользящее и мажоритарное резервирование.

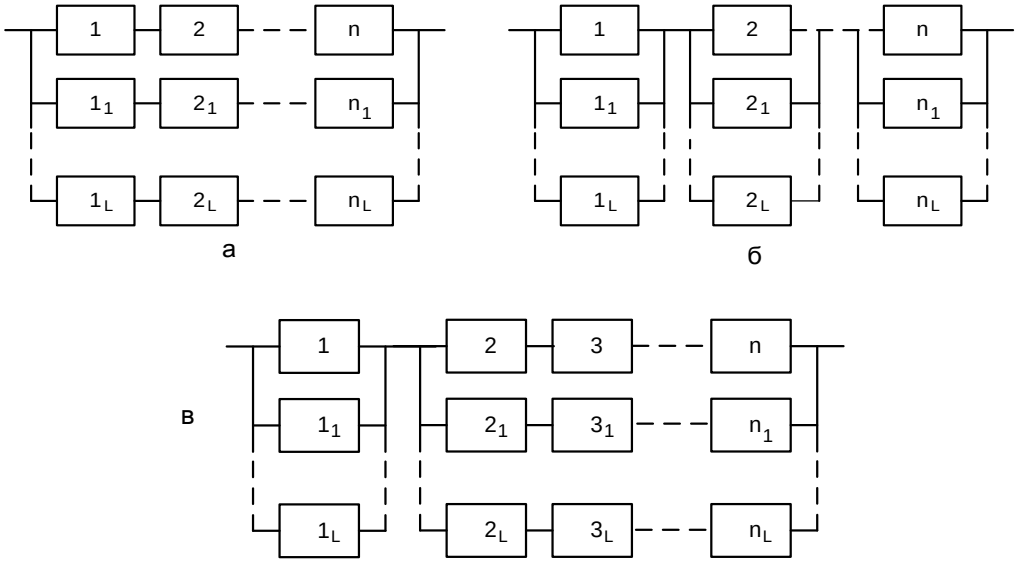


Рис. 3.1. Нагруженное резервирование: а – общее, б – раздельное, в – смешанное

При постоянном резервировании в случае возникновения отказа не происходит перестройки структуры системы. Не требуется специальных устройств, вводящих в действие резервный элемент, а также отсутствует перерыв в работе. Это как раз и есть параллельное соединение элементов.

Динамическое резервирование позволяет изменять структуру системы при возникновении отказа элемента.

Резервирование замещением – резервирование, при котором часть средств, способных выполнять требуемую функцию, предназначена для работы, а остальная часть средств не работает до момента появления необходимости в ней, см. рис. 3.2. Такой вид резервирования требует специальных переключающих устройств, равных числу основных элементов, что может понижать надежность всей системы. Обычно резервирование замещением бывает общим.

Скользящее резервирование используется для резервирования нескольких одинаковых элементов системы одним или несколькими одинаковыми резервными, см. рис. рис. 3.2, б: здесь элементы 1, 2 и 3 идентичны, а элемент 4 – избыточный. Очевидно, отказ системы произойдет, если из общего количества идентичных элементов число отказавших превысит число резервных.

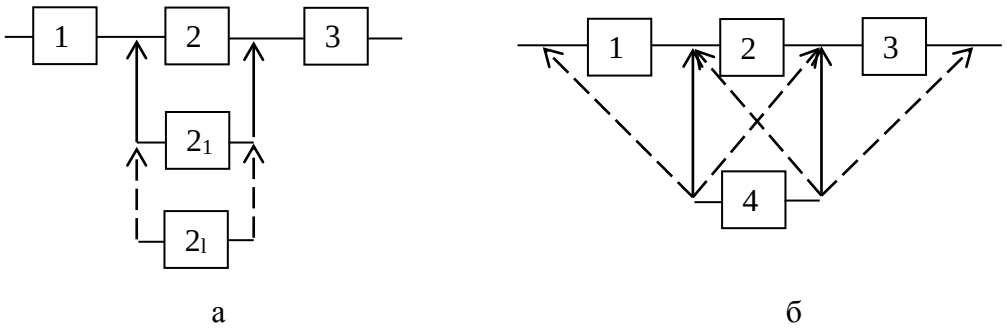


Рис. 3.2. Резервирование замещением (а), скользящее резервирование (б)

Мажоритарное резервирование – способ «голосования» элементов, где побеждает большинство «2 из 3» (или «3 из 5») рис. 3.3. Дополнительный логический элемент сравнивает сигналы, поступающие от 3-х (или 5) элементов выполняющих одну и ту же функцию. Если результаты совпадают хотя бы у 2 (или 3) элементов, то они передаются на выход устройства.

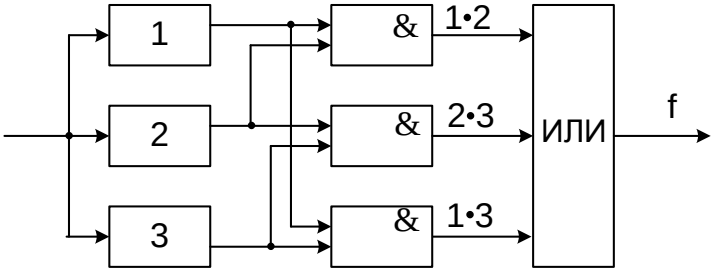


Рис. 3.3. Мажоритарное резервирование $f = 1 \cdot 2 \vee 2 \cdot 3 \vee 1 \cdot 3$

3) По режиму работы резерва выделяют: нагруженный, облегченный и ненагруженный. Другой вариант названий: горячий, теплый и холодный резервы соответственно.

Нагруженное резервирование – резервирование, при котором все средства, способные выполнять требуемую функцию, работают одновременно.

Облегченное резервирование – резервные элементы находятся в менее нагруженном режиме по сравнению с основными.

Ненагруженное резервирование – резервные элементы до начала выполнения ими функций находятся в ненагруженном режиме.

4) Основной характеристикой структурного резервирования является *кратность резервирования l* – отношение числа резервных элементов *m* к числу резервируемых ими основных элементов *n*, выраженное несокращаемой дробью. Различают резервирование с целой кратностью: один основной элемент резервируется одним или несколькими резервными элементами.

$$l = \frac{m}{n} \tag{3.1}$$

Резервирование с дробной кратностью – два и более однотипных элемента резервируются одним и более резервными элементами. Обычно число основных превышает число резервных. Резервирование с кратностью 1:1 называется *дублированием*.

Резервирование m из n – резервирование, при котором m изделий из общего их количества n должны функционировать для выполнения требуемой функции.

3.1.2. Эффективность резервирования

Свойства структурного резервирования и эффективность его применения можно оценить путем анализа выигрыша надежности. Необходимо рассчитать выигрыш надежности по вероятности безотказной работы, по вероятности отказа, среднему времени безотказной работы, интенсивности отказов, функции и коэффициенту готовности, наработке на отказ.

Выигрыш надежности определяется как отношение показателя надежности резервированной системы к тому же ПН системы без резервирования.

Например, для системы из n последовательно соединенных элементов после дублирования k-элемента, см. рис. 3.4, коэффициент выигрыша надежности по вероятности безотказной работы составит G_P:

$$G_p = \frac{P'}{P} = \frac{p_1 p_2 \dots p_{k-1}\left[1-(1-p_k)^2\right]p_{k+1}\dots p_n}{p_1 p_2 \dots p_{k-1} p_k p_{k+1} \dots p_n} = \frac{1-(1-p_k)^2}{p_k} = 2 - p_k. \qquad (3.2)$$

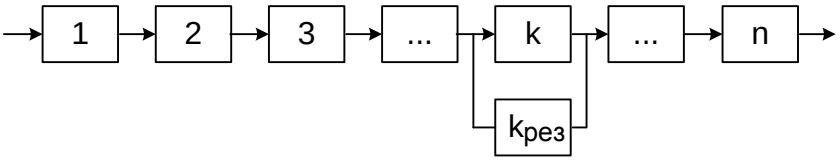


Рис. 3.4. Пример структурной схемы надежности

Из формулы (3.2) следует, что эффективность резервирования (или другого приема повышения надежности) тем больше, чем меньше надежность резервируемого элемента. Например, для $p_k = 0{,}9$ выигрыш составит $G_p = 1{,}1$; для $p_k = 0.5$ выигрыш надежности $G_p = 1{,}5$.

Следовательно, при структурном резервировании максимального эффекта можно добиться резервированием самых ненадежных элементов или групп элементов (слабых звеньев).

В общем случае при выборе элемента (или группы элементов) для повышения надежности или резервирования необходимо исходить из условия обеспечения при этом максимального эффекта, то есть максимального выигрыша по требуемому ПН.

Для случая постоянного резервирования с кратностью l выигрыш по среднему времени безотказной работы будет [1]:

$$G_T = \frac{T'}{T_0} = \sum_{i=1}^{l+1} \frac{1}{i} \qquad (3.3)$$

где T_0 – время безотказной работы нерезервированной системы, T' – время резервируемой системы.

Из формулы (3.3) можно сделать вывод, что значительное повышение кратности резервирования ведет к несущественному повышению среднего времени безотказной работы. Например, для увеличения T в 2 раза необходима кратность резервирования $l = 3$, а в 3 раза уже кратность $l = 10$.

При резервировании замещением среднее время безотказной работы растет пропорционально количеству резервных элементов:

$$T' = (m+1)T_0 \qquad (3.4)$$

3.2. Система обеспечения надежности

Ведущей концепцией, на основе которой решается задача исследования и повышения надежности любого изделия, является *системность*. Системы обеспечения надежности охватывают весь жизненный цикл изделия от разработки до эксплуатации. При этом методы обеспечения надлежащего уровня надежности специфичны для каждого этапа жизненного цикла. Так, для обеспечения *проектной надежности* АСУ необходимо:

- для аппаратуры системы выбрать соответствующие материалы, запасы прочности, конструкции, оптимальные схемы резервирования;

- для разработки программного обеспечения избрать оптимальные алгоритмы работы системы.

Управление надежностью – совокупность организационных и научно-технических мер, направленных на обеспечение, поддержание и повышение надежности объектов, реализуемых на всех стадиях их жизненного цикла (ГОСТ 27.001-95).

Технологическая надежность аппаратуры обеспечивается бездефектными, стабильными технологическими процессами производства. Для разработки программного обеспечения (ПО) необходимо воспользоваться современными Case-технологиями.

Эксплуатационная надежность определяется организацией технического обслуживания аппаратуры и сопровождения ПО.

Большинство элементов АСУ являются восстанавливаемыми. При этом быстрота и качество восстановления зависят от приспособленности объектов к ремонту (ремонтопригодности) и от организации восстановления. Восстановление включает решение следующих вопросов:

- обнаружение факта появления отказа;
- обнаружение места отказа;
- устранение отказа (ремонт или замена).

3.2.1. Стандарты на техническое обслуживание

В разделе представлены определения из ГОСТ 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения.

Техническое обслуживание (в области надежности в технике) – совокупность всех технических и организационных действий, направленных на поддержание или возвращение изделия в работоспособное состояние.

Стратегия технического обслуживания – общий подход к обеспечению технического обслуживания и его поддержки, основанный на целях и политике владельцев, пользователей и клиентов.

Концепция технического обслуживания – описание взаимосвязей между эшелонами технического обслуживания, уровнями разукрупнения и уровнями технического обслуживания для последующего проведения технического обслуживания изделия.

План технического обслуживания – документально оформленный набор задач, методов, ресурсов и технических средств, которые будут использоваться в определенном порядке при проведении технического обслуживания конкретного изделия.

График технического обслуживания – документ, устанавливающий расписание во времени порядка выполнения работ профилактического технического обслуживания. Временной порядок может быть определен как соответствующее изделию и его эксплуатационному состоянию расписание работ в календарном времени, времени при хранении, рабочем времени, циклах или расстоянии.

Эшелон технического обслуживания – место в организационной структуре, где предусмотрено выполнение определенных уровней технического обслуживания. Примерами могут быть полевые условия, ремонтная мастерская, средства изготовителя.

Уровень технического обслуживания – набор операций технического обслуживания, подлежащих выполнению на определенном уровне разукрупнения.

Профилактическое техническое обслуживание – техническое обслуживание, выполняемое с целью уменьшения вероятности отказа или компенсации снижения работоспособного состояния и проводимое до наступления отказа через заранее установленные интервалы использования или хранения или по предписанным критериям оценки состояния изделия.

Корректирующее техническое обслуживание – техническое обслуживание, выполняемое после обнаружения неисправности с целью возвращения изделия в работоспособное состояние.

Техническое обслуживание по состоянию – профилактическое техническое обслуживание, основанное на оценке результатов мониторинга физических параметров. Мониторинг параметров может быть непрерывным, по расписанию или по запросу.

Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность – систематизированный метод, определяющий соответствующие задачи и частоту повторения операций технического обслуживания, в основу которого положены вероятности и последствия отказов.

Автоматическое техническое обслуживание – техническое обслуживание, выполняемое без вмешательства человека.

Отсроченное техническое обслуживание – техническое обслуживание, отложенное после установления потребности в его проведении, в соответствии с принятыми правилами технического обслуживания. Отсроченное техническое обслуживание может относиться к профилактическому и корректирующему техническому обслуживанию. Техническое обслуживание может быть отсрочено в целях обеспечения готовности, по материально-техническим, экономическим или экологическим причинам.

Задание технического обслуживания – последовательность элементарных операций технического обслуживания, проводимого с заданной целью. Примерами могут быть локализация неисправности, диагностирование неисправности, устранение неисправности, проверка функционирования.

Плановое техническое обслуживание (в области надежности в технике) – техническое обслуживание, выполняемое в соответствии с установленным расписанием.

Неплановое техническое обслуживание (в области надежности в технике) – техническое обслуживание, которое не может быть отсрочено.

Ремонт (в области надежности в технике) – часть корректирующего технического обслуживания, включающая непосредственные действия, выполняемые на изделии. Ремонт включает локализацию неисправности, диагностирование неисправности, устранение неисправности и проверку функционирования.

Обнаружение неисправности – событие, при котором наличие неисправности становится очевидным.

Локализация неисправности – действия, направленные на идентификацию неисправной составной части или нескольких составных частей на соответствующем уровне разукрупнения.

Диагностирование неисправности – действия, проводимые с целью установления наличия неисправности, локализации неисправности и определения причин ее появления.

Устранение неисправности – действия, проводимые после диагностирования неисправности для восстановления работоспособного состояния изделия.

Проверка функционирования – действия, проводимые после устранения неисправности для подтверждения работоспособного состояния изделия.

Восстановление – событие, при котором после неисправности наступает работоспособное состояние изделия.

Техническое обслуживание на месте эксплуатации – техническое обслуживание, выполняемое на месте использования или хранения изделия.

Техническое обслуживание вне места эксплуатации – техническое обслуживание, выполняемое после удаления изделия с места использования или хранения

Контроль состояния – операции, выполняемые автоматически или вручную с целью определения и квалификации состояния изделия. Контроль состояния используют для установления потребности в техническом обслуживании.

Дистанционное техническое обслуживание – техническое обслуживание, выполняемое без физического доступа персонала к изделию.

3.2.2. Поддержка технического обслуживания

Взаимосвязь между продолжительностью неработоспособного состояния, техническим обслуживанием и ремонтом представлена на рис. 3.5.

Вероятность выполнения технического обслуживания $M(t_1, t_2)$ – вероятность выполнения задания технического обслуживания изделия, эксплуатируемого в данных условиях в установленный интервал времени (t_1, t_2) с применением штатных методов и средств.

Продолжительность технического обслуживания (в области надежности в технике) – время технического обслуживания, включая время выполнения необходимых действий, а также любые технические задержки, включая материально-техническое обеспечение, кроме административных задержек и времени обнаружения неисправности. В некоторых случаях техническое обслуживание может выполняться при функционировании изделия.

Трудоемкость технического обслуживания – суммарные продолжительности индивидуальных времен технического обслуживания, выраженные в часах, затраченные всем персоналом при выполнении действий технического обслуживания.

Оперативная продолжительность технического обслуживания – часть продолжительности выполнения технического обслуживания, включая технические задержки, но исключая логистические задержки.

Продолжительность профилактического технического обслуживания – часть продолжительности технического обслуживания, потраченная на выполнение профилактического технического обслуживания, включая технические и логистические задержки.

Продолжительность корректирующего технического обслуживания – часть продолжительности технического обслуживания, потраченная на выполнение корректирующего технического обслуживания, включая технические и логистические задержки.

Оперативная продолжительность профилактического технического обслуживания – часть оперативной продолжительности технического обслуживания, потраченная на выполнение профилактического технического обслуживания.

Оперативная продолжительность корректирующего технического обслуживания – часть оперативной продолжительности технического обслуживания, потраченная на выполнение действий корректирующего технического обслуживания.

Время необнаруженной неисправности – интервал времени между отказом и обнаружением возникшей из-за него неисправности.

Административная задержка – задержка выполнения технического обслуживания вследствие административных причин. Примером может быть ожидание разрешения доступа к изделию. *Средняя административная задержка* – математическое ожидание административной задержки.

Логистическая задержка – задержка вследствие необеспеченности ресурсами, необходимыми для проведения технического обслуживания, за исключением административной задержки. Примерами могут быть поездка до места, ожидание запасных частей, специалистов, информации, неприемлемые условия окружающей среды. *Средняя логистическая задержка* – математическое ожидание логистической задержки.

Время устранения неисправности – часть оперативной продолжительности корректирующего технического обслуживания, потраченная на устранение неисправности.

Техническая задержка – задержка вследствие выполнения вспомогательных технических действий, связанных с соответствующим заданием технического обслуживания. Примерами могут быть действия по обеспечению безопасности оборудования – отключение, охлаждение, изоляция и заземление.

Время проверки функционирования – часть оперативной продолжительности технического обслуживания, потраченная на проверку функционирования.

Время обнаружения неисправности – часть оперативной продолжительности корректирующего технического обслуживания, потраченная на обнаружение неисправности.

Время локализации неисправности – часть оперативной продолжительности корректирующего технического обслуживания, потраченная на локализацию неисправности.

Продолжительность ремонта – часть оперативной продолжительности корректирующего технического обслуживания, потраченная на ремонт. *Средняя продолжительность ремонта* – математическое ожидание продолжительности ремонта.

Интенсивность восстановления $\mu(t)$ – предел, если он существует, отношения условной вероятности окончания корректирующего ремонта в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ к длине этого интервала Δt, стремящейся к нулю, при условии, что ремонт был начат во время $t = 0$ и не был закончен до времени t.

Среднее значение оперативной продолжительности корректирующего технического обслуживания – математическое ожидание оперативной продолжительности корректирующего технического обслуживания.

Среднее время до восстановления – математическое ожидание времени до восстановления.

Полнота обнаружения неисправностей – доля неисправностей, которые могут быть диагностированы в данных условиях.

Полнота ремонта – доля обнаруженных неисправностей, которые могут быть успешно устранены.

Гамма-процентное время до восстановления – время, в течение которого восстановление будет осуществлено с вероятностью γ, выраженной в процентах.

Рис. 3.5 Взаимосвязь между продолжительностью неработоспособного состояния, технического обслуживания и ремонта

3.3. Диагностирование как средство повышения надежности на стадии эксплуатации

Термин «диагностика» происходит от греческого «диагностикос», что означает распознавание, определение. В процессе диагностирования изделию обычно ставится диагноз, то есть определяется его техническое состояние с указанием места, вида и причины дефекта (если он есть). Диагноз представляет собой процесс исследования объекта. Объект, состояние которого определяется, будем называть *объектом диагноза*. Характерными примерами результатов диагноза состояния технического объекта являются заключения вида: объект исправен, в объекте имеется какая-то неисправность.

Таким образом, диагностика есть отрасль знаний, включающая в себя теорию и методы организации процессов диагноза, а также принципы построения средств диагноза. Когда объектами диагноза являются объекты технической природы, говорят о технической диагностике. Техническая диагностика решает три типа задач:

- задача диагноза: определение состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени.
- задача прогноза (от греческого «прогнозис» – предвидеть, предсказывать): предсказание состояния, в котором объект окажется в будущий момент времени. Используется для определения срока службы оборудования или необходимой периодичности проверок и ремонтов.
- задача генеза («генезис» – происхождение, возникновение): определение состояния, в котором объект находился в некоторый момент времени в прошлом. Необходимость определить причины, вызвавшие аварию.

Одной из важнейших задач диагноза состояния объекта является поиск неисправностей, т.е. указание мест и, по возможности, причин возникновения неисправностей. Поиск неисправностей необходим для выявления и замены неисправных компонентов. После устранения неисправности объект становится исправным, работоспособным или правильно функционирующим.

Диагноз технического состояния объекта осуществляется при помощи тех или иных средств диагноза. Взаимодействующие между собой объект и средства диагноза образуют систему технической диагностики (СД). Протекающий в СД процесс в общем случае представляет собой многократную подачу на объект определенных воздействий (входных сигналов) и многократное измерение и анализ реакций (выходных сигналов) объекта на эти воздействия. Воздействия на объект либо поступают от средств диагноза, либо являются внешними (по отношению к системе диагноза) сигналами, определяемыми рабочим алгоритмом функционирования объекта. Измерение и анализ ответов объекта всегда осуществляются средствами диагноза.

В качестве количественных и качественных характеристик технических состояний изделия обычно используются контролируемые параметры с установленными нормативами по допустимому изменению их численных значений. Например, объектом диагноза является электрический кабельный жгут. По качественным показателям он оценивается по проверке правильности распайки (монтажа) проводов. Количественно он оценивается по сопротивлению изоляции между разными цепями.

По каждому из перечисленных параметров в эксплуатационной документации указываются порядок соединения проводов и предельно допустимые значения. По соответствию или несоответствию численных значений параметров установленным требованиям можно однозначно определить техническое состояние.

Организация технической диагностики АСУ представлена на рис. 3.4 Как известно, в ряде случаев поиск места и причины неисправности может составлять до 90 % всего времени, затрачиваемого на восстановление системы [5].

Под *параметром* в технической диагностике понимают наименование какой-либо физической величины, устанавливаемой для отличия данного состояния от других состояний объекта контроля.

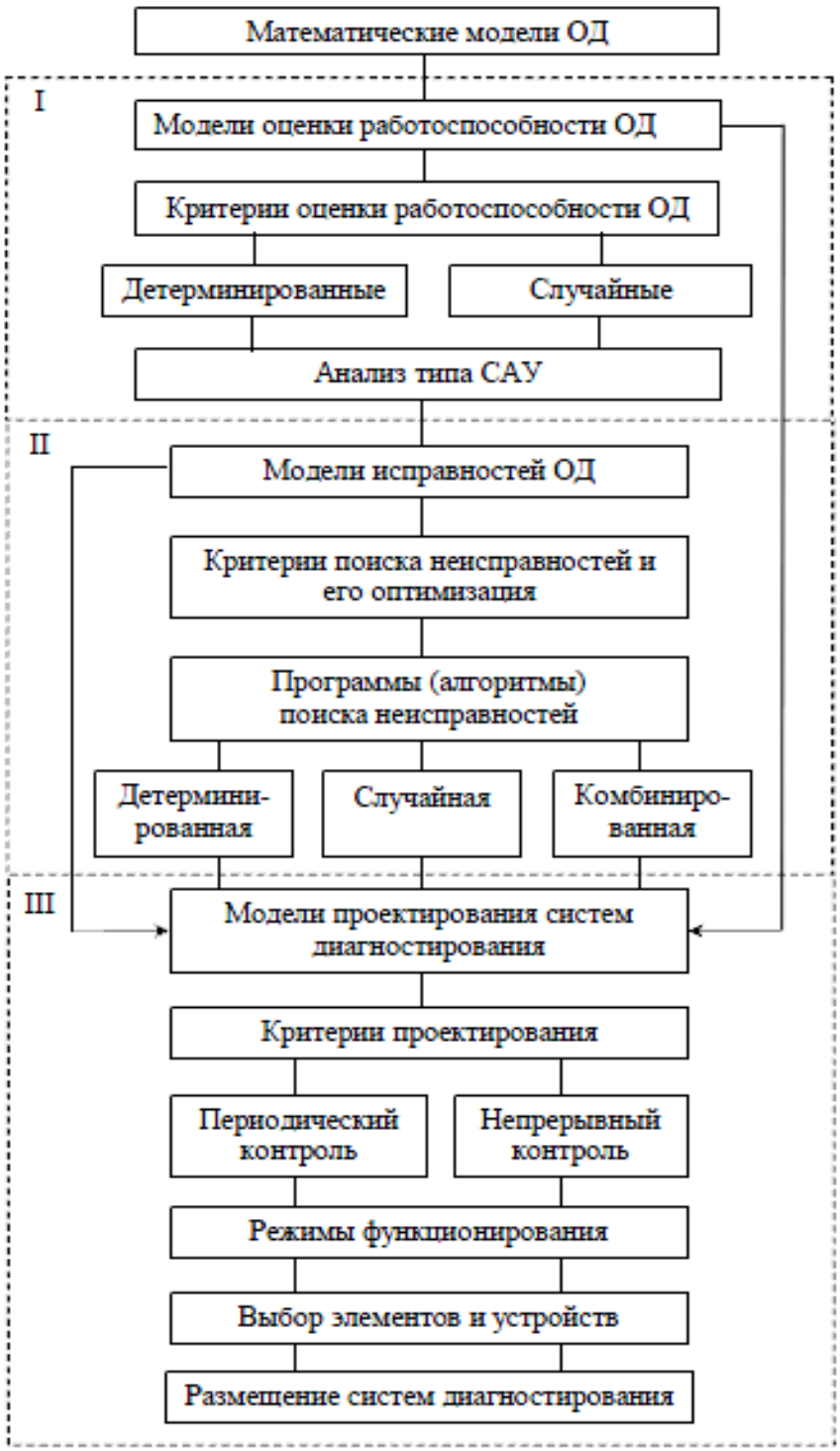


Рис. 3.6 Организация технического диагностирования АСУ

Помимо параметров для оценки технического состояния объектов в технической диагностике используется понятие – *признак состояния*.

Под *признаком состояния* понимают значение (или интервал значений) какого-либо параметра, устанавливаемого для отличия данного состояния от других состояний. Смысловым эквивалентом признака состояния является *значение*.

По каждому контролируемому параметру в эксплуатационной документации указывается нормативное значение, чаще всего соответствующее состояниям: функционирования, работоспособности или исправности. Реже указываются нормативы параметра для нефункционирующего, неработоспособного или неисправного состояний.

Нормативные значения параметров могут указываться в виде: числа с указанием размерности (например, 5 mA); диапазона чисел с указанием размерности (2…4 В).

В эксплуатационной документации наряду с параметром, и его значением также указывают и условия, диагностическую аппаратуру, а иногда – технологию контроля и интерпретации результатов контроля.

3.3.1 Показатели контролепригодности изделий

Контролепригодность – свойство изделия обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Контролепригодность обеспечивается конструкцией изделия и принятой системой технической диагностики.

Контролепригодность изделия задается на стадии разработки и обеспечивается на стадии производства, в последствии при эксплуатации возможности улучшения контролепригодности практически отсутствуют.

Основные показатели контролепригодности приведены ниже.

- *Коэффициент полноты проверки исправности* $K_{ПП}$ (работоспособности, функционирования) – отношение суммарной интенсивности отказов проверяемых составных частей изделия $\lambda к$ к суммарной интенсивности отказов всех составных частей изделия $\lambda о$:

$$K_{ПП} = \frac{\lambda_K}{\lambda_0} \tag{3.5}$$

- *Коэффициент глубины поиска дефекта (повреждения)* $K_{ГП}$ – отношения числа R составных частей изделия, с точностью до которых определяется место дефекта к общему N числу составных частей изделия, с точностью до которых требуется определение места дефекта:

$$K_{ГП} = \frac{R}{N} \tag{3.6}$$

- *Среднее время подготовки изделия к диагностированию* заданным числом специалистов $T_В = T_{Усл} + T_{МДР}$, где $T_{Усл}$ – среднее время установки и снятия измерительных устройств, необходимых для диагностирования; $T_{МДР}$ – среднее время монтажно-демонтажных работ на изделии, необходимых для подготовки к диагностированию.
- *Средние трудозатраты на подготовку изделия к диагностированию* $Q_В = Q_{Усл} + Q_{МДР}$, где $Q_{Усл}$ – средние трудозатраты на установку и снятие измерительных устройств, необходимых для диагностирования; $Q_{МДР}$ – средние трудозатраты на монтажно-демонтажные работы на изделии, необходимые для подготовки к диагностированию.
- *Коэффициент избыточности изделия* $K_{ИИ}$ – соотношение массы $G_Д$ составных частей, введенных в конструкцию для диагностирования изделия и общей массы $G_{ИД}$ всего изделия:

$$K_{ИИ} = \frac{G_Д - G_{ИД}}{G_Д} = 1 - \frac{G_{ИД}}{G_Д} \tag{3.7}$$

- Коэффициент трудозатрат на подготовку к диагностированию $K_{ТД}$ – соотношение средних трудозатрат на диагностирование изделия $Q_Д$ и средних трудозатрат на подготовку изделия к диагностированию $Q_В$:

$$K_{ТД} = \frac{Q_Д - Q_В}{Q_Д} = 1 - \frac{Q_В}{Q_Д} \tag{3.8}$$

- Дифференциальная оценка контролепригодности g_i – отношение значение любого из указанных выше *i*-го показателя ремонтопригодности изделия K_i к номинальному значению этого же *i*-го показателя ремонтопригодности для эталонного изделия K_{Hi}:

$$g_i = \frac{K_i}{K_{Hi}} \tag{3.9}$$

- Комплексная оценка контролепригодности *g*:

$$g = \prod_{i=1}^{n} (a_i g_i) , \tag{3.10}$$

где *n* – количество показателей контролепригодности рассматриваемого изделия; g_i – *i*-ая дифференциальная оценка контролепригодности; a_i – коэффициент весомости *i*-го показателя контролепригодности.

3.3.2 Показатели диагностирования

Стандартом устанавливаются следующие показатели диагностирования:

- вероятность ошибки диагностирования P_{ij};
- апостериорная вероятность ошибки диагностирования P_{aij};
- вероятность правильного диагностирования (достоверность контроля) *D*;
- средняя оперативная продолжительность диагностирования $T_Д$;
- средняя стоимость диагностирования $C_Д$;
- средние оперативные трудозатраты на диагностирование $Q_{Д.}$

Показатели диагностирования определяются при проектировании, испытаниях и эксплуатации СД. Показатели включаются в техническое задание на изделие и нормируются.

Вероятность ошибки диагностирования P_{ij}. В общем случае вероятность ошибки диагностирования P_{ij} вычисляют по формуле

$$P_{ij} = P_{0i} \sum_{l=1}^{k} P_{cl} P_{yjil} \ , \tag{3.11}$$

где k – количество технических состояний СД; P_{0i} – априорная вероятность нахождения объекта диагностирования (ОД) в состоянии i; P_{cl} – априорная вероятность нахождения СД в состоянии l; P_{yjil} – условная вероятность того, что в результате диагностирования ОД призна-

ется находящимся в состоянии j при условии, что он находится в состоянии i и СД находится в состоянии l.

По статистическим данным оценку вероятности ошибки диагностирования определяют по формуле

$$\hat{P}_{ij} = P_{0i} \sum_{l=1}^{k} P_{cl} \frac{r_{jil}}{N_{il}}, \tag{3.12}$$

где N_{il} – общее число испытаний системы диагностирования когда объект находится в состоянии i средством диагностирования, находящимся в состоянии l; r_{jil} – число испытаний, при которых система диагностирования зафиксировала состояние j [8].

Вероятность правильного диагностирования часто называют достоверностью контроля и считают основным показателем диагностирования.

Достоверность контроля – это показатель степени объективного отображения результатами контроля действительного технического состояния изделия.

Вероятность правильного диагностирования (достоверность контроля) D вычисляют по формуле, где P_{ij} – вероятность ошибки диагностирования вида (i, j); n – число возможных технических состояний объекта диагностирования:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{n} P_{ij} \tag{3.13}$$

Для СД, определяющих работоспособное и неработоспособное состояния объекта n = 2. Для СД, предназначенных для проверки работоспособности возможны ошибки диагностирования видов i=1, j=2 и i=2, j=1.

3.3.3. Методы диагностирования систем автоматизации, управления и программно-технических средств автоматизации

На рис. 3.7 представлены обобщенные функциональные схемы системы тестового диагноза и системы функционального диагноза технического состояния. Системы содержат ОД и СД. Физически каждая линия схемы, снабженная стрелкой на конце, может представлять несколько каналов передачи информации.

Как видно из рис. 3.7, а в *системах тестового диагноза* воздействия на объект поступают от средств диагноза. Поэтому как состав, так и последовательности подачи этих воздействий можно выбирать, исходя из условий эффективной организации процесса диагноза. Более того, каждое очередное воздействие в процессе диагноза может назначаться в зависимости от ответов объекта на предыдущие воздействия. Воздействия в системах тестового диагноза будем называть тестовыми. Тестовые воздействия могут подаваться как в периоды времени, когда объект не используется по прямому назначению, так и в процессе выполнения им его рабочего алгоритма функционирования. Во втором случае, однако, тестовыми воздействиями могут быть только такие сигналы, которые не мешают нормальной работе объекта. Например, при инерционных исполнительных механизмах некоторого функционирующего объекта возможна подача кратковременных импульсных тестовых воздействий на схемы управления этими механизмами [8].

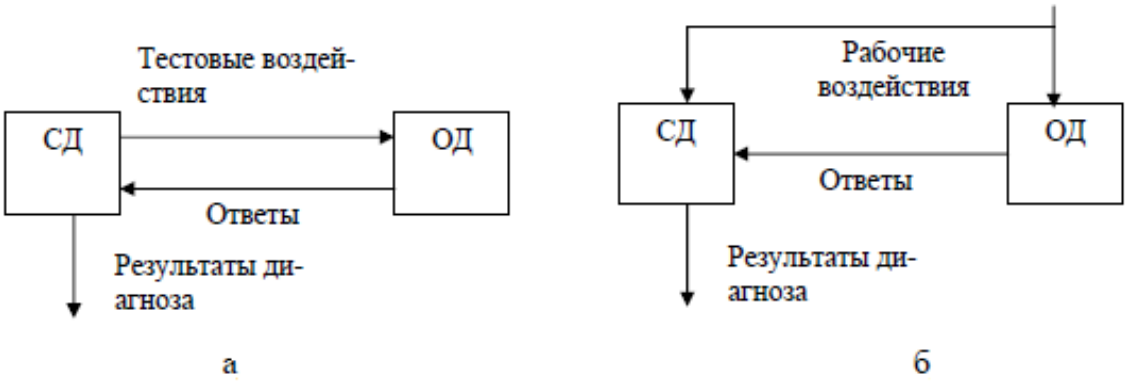


Рис. 3.7. Функциональные схемы систем диагноза технического состояния:
а – система тестового диагноза; б – система функционального диагноза

Тестовые воздействия могут подаваться как на основные входы объекта, т.е. на его входы, необходимые для применения объекта по назначению, так и на дополнительные входы, организованные специально для целей диагноза.

В *системах функционального диагноза* воздействия, поступающие на основные входы объекта, заданы его рабочим алгоритмом функционирования и поэтому не могут выбираться, исходя из условий эффективной организации процесса диагноза. Эти воздействия будем называть рабочими. Указанная на рис. 3.5, б подача рабочих воздействий и на СД часто имеет место в системах функционального диагноза, хотя и не является обязательной.

Системы функционального диагноза могут использоваться также в режимах имитации функционирования объекта. При этом должна быть обеспечена имитация рабочих воздействий. Такое использование систем функционального диагноза целесообразно при наладке или ремонте объекта.

Ответы объекта (на тестовые или на рабочие воздействия) в обоих видах систем диагноза поступают на средства диагноза. Ответы могут сниматься как с основных выходов объекта, т.е. с выходов, необходимых для применения объекта по назначению, так и с дополнительных выходов, организованных специально для целей диагноза. Эти основные и дополнительные выходы часто называют контрольными точками.

СД реализуют некоторый алгоритм диагноза, задающий состав и очередность реализации, а также способ анализа результатов элементарных проверок объекта в ходе технической диагностики.

Реализация элементарных проверок заключается в выработке и подаче на объект входных сигналов (воздействий) и в приеме и измерении соответствующих выходных сигналов (ответов). Для реализации этих операций СД должны содержать источники воздействий (в системах тестового диагноза), измерительные устройства и устройства связи источников воздействий и измерительных устройств с объектом.

Целью анализа результатов элементарных проверок является получение результатов диагноза, т. е. определение технических состояний, в одном из которых фактически находится объект.

Результаты элементарных проверок представлены в виде значений сигналов в контрольных точках. Результаты же диагноза должны быть представлены в иной форме, более удобной для практического их использования. Например, при проверке исправности результатом диагноза должен быть один из ответов: «объект исправен» или «объект неисправен», а при поиске неисправностей – «в объекте неисправна такая-то конкретная компонента (узел, блок, деталь)». Другими словами, требуется расшифровка (анализ, преобразование) результатов элементарных проверок, полученных в процессе реализации алгоритма диагноза.

В простейшем случае такая расшифровка может представлять собой обычное сравнение физических значений сигналов в контрольных точках с заданными эталонными

значениями этих сигналов. Заметим, что при недостаточном уровне автоматизации процесса диагноза, в частности, при использовании ручных средств диагноза функции расшифровки результатов элементарных проверок возлагаются на человека.

Так или иначе, для выполнения операций анализа результатов элементарных проверок средства диагноза должны располагать определенной информацией о поведении исправного объекта. Аппаратуру средств диагноза, хранящую информацию о поведении объекта, или другой носитель этой информации будем называть *физической моделью объекта*. Наглядным примером физической модели объекта является эталонный, заведомо исправный его экземпляр. Однако во многих случаях такая физическая модель информационно избыточна и зачастую трудно реализуема. В широко распространенных системах централизованного контроля, являющихся системами проверки правильности функционирования, физическая модель объекта представляет собой аппаратуру для задания допустимых значений (уставок) контролируемых параметров, а также средства коммутации и подключения этой аппаратуры к устройствам сравнения допустимых значений.

Средства, осуществляющие сопоставление информации об объекте с фактическими результатами элементарных проверок и вырабатывающие сигнал «результаты диагноза», назовем *блоком расшифровки результатов*.

Наконец, средства диагноза должны иметь тот или иной носитель алгоритма диагноза. Носителем жестких или редко изменяемых алгоритмов диагноза обычно является аппаратура, конструктивно объединенная с остальной аппаратурой средств диагноза. Для задания сменных алгоритмов диагноза часто применяются стандартные программоносители - магнитные барабаны, магнитные ленты, гибкие магнитные диски, жесткие диски и т. п. В последнем случае, естественно, средства диагноза должны содержать соответствующие устройства считывания информации с программоносителей.

Итак, по завершении процесса определения технического состояния объекта средства диагноза вырабатывают сигнал «результаты диагноза». Знание технического состояния объекта может быть использовано для различных целей, в том числе, например, для выбора и применения другого алгоритма диагноза, позволяющего более точно определить техническое состояние объекта.

Для построения математических моделей объектов диагноза в процессе проектирования и создания систем диагноза необходимо знать физические свойства и характеристики этих объектов.

В получении таких знаний важное место занимает изучение возможных физических неисправностей объекта, а также параметров, характеризующих исправное и все неисправные состояния объекта. При этом полезна классификация объектов по принципу их действия, по назначению, по сложности, по энергетическим и другим признакам. Необходимо также классифицировать неисправности по их видам (например, на производственные и эксплуатационные, на катастрофические и постепенные), определять вероятности или частности, анализировать причины их возникновения, разрабатывать методы определения признаков неисправностей и т.п. Работы по исследованию параметров объектов включают в себя разработку методов задания допусков и определения контрольных соотношений между отдельными параметрами, изучение вопросов точности измерения параметров при диагнозе, определение законов изменения параметров во времени и т.п.

Для построения оптимальных алгоритмов диагноза большое значение имеет организация сбора и обработки статистических данных, особенно по вероятностям возникновения неисправностей и по затратам (времени, энергии, материальных или денежных средств) на отыскание неисправностей и их устранение. Отметим, что статистические данные важны не только для оптимизации алгоритмов диагноза, но также для эффективного решения задач технической прогностики и технической генетики.

ОД могут быть любые технические изделия, устройства или системы, относительно которых имеет смысл ставить и решать задачи проверки их исправности, работоспособности, правильности функционирования или задачи поиска неисправностей.

Последствия любых явлений или действий, которые переводят объект в некоторое неисправное состояние, называются физическими неисправностями объекта.

Взаимодействие объекта с внешней средой осуществляется через его основные и дополнительные входы и выходы. Сигналы на входах и выходах объекта характеризуются параметрами тех физических величин, с помощью которых передаются указанные сигналы. Часто возникает необходимость рассматривать внутренние параметры объекта, т. е. такие параметры, которые не являются его входными или выходными. Например, необходимо замерить сопротивление резистора, снять напряжение на трансформаторе и т.д.

Последовательности (или, в частном случае, совокупности) возможных значений входных параметров образуют множество возможных воздействий на объект. Аналогично, множество ответов объекта определяется последовательностью (или, в частном случае, совокупностью) значений его выходных параметров.

Таким образом, воздействие на объект (ответ объекта) характеризуется составом входов (выходов) и теми моментами времени, в которые поступают заданные (измеряются получаемые) значения параметров на этих входах (выходах). Последовательность (совокупность) значений указанных параметров можно называть значением воздействия (ответа).

Элементарная проверка представляет собой некоторый физический эксперимент над объектом и определяется значением воздействия, подаваемого или поступающего на объект, а также ответом объекта на это воздействие. Значение ответа объекта является результатом элементарной проверки. ОД, находящийся в разных технических состояниях выдает разные результаты одной и той же элементарной проверки. Понятие элементарной проверки применимо также к отдельным компонентам объекта. В этом случае предполагается доступность входов и выходов компонент, что может потребовать организации дополнительных входов и выходов объекта [8].

3.3.4. Алгоритмы диагностирования

Алгоритмом диагностирования называется совокупность предписаний о порядке проведения диагностирования. Он задает совокупность элементарных проверок, их последовательность, правила их реализации и правила обработки результатов контроля.

Алгоритм диагноза задает совокупность элементарных проверок, последовательность их реализации и правила обработки результатов реализуемых элементарных проверок.

Результаты любой элементарной проверки могут быть использованы как признаки разбиения множества E технических состояний объекта или подмножеств этого множества на классы. Любой алгоритм диагноза можно представить некоторым ориентированным графом. Ограничимся случаем, когда граф, представляющий алгоритм диагноза является деревом.

Дерево имеет вершины двух типов: вершины, из которых исходит хотя бы одна дуга, и вершины, из которых не отходит ни одной дуги.

Пример дерева дан на рис. 3.8, где вершины первого типа представлены зачерненными кружками, а вершины второго типа – светлыми. В дереве имеется единственная вершина первого типа, в которую не заходит ни одна дуга. Эта вершина называется начальной, или корнем дерева (t_0, E). Вершины, из которых не исходит ни одной дуги, называются конечными, или висячими. Остальные вершины дерева называются внутренними. В каждую вершину дерева, кроме его корня, заходит только одна дуга. В дереве нет контуров.

Рангом вершины дерева называется число дуг пути, начинающегося в начальной вершине и заканчивающегося в рассматриваемой вершине. Минимальным рангом 0ρ дерева является ранг, для которого существует хотя бы одна висящая вершина и не существует ни одной висящей вершины ранга меньше 0ρ. Максимальным рангом $м\rho$ дерева является ранг,

для которого существует хотя бы одна вершина ранга *м*ρ и не существует ни одной вершины ранга больше *м*ρ [8].

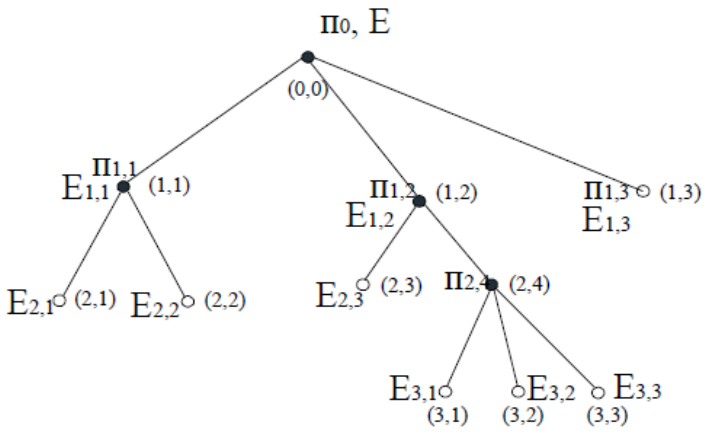


Рис. 3.8. Дерево алгоритма диагноза

Алгоритм диагноза задает совокупность элементарных проверок, последовательность их реализации и правила обработки результатов реализуемых элементарных проверок.

Результаты любой элементарной проверки могут быть использованы как признаки разбиения множества *E* технических состояний объекта или подмножеств этого множества на классы. Любой алгоритм диагноза можно представить некоторым ориентированным графом. Ограничимся случаем, когда граф, представляющий алгоритм диагноза является деревом.

Дерево имеет вершины двух типов: вершины, из которых исходит хотя бы одна дуга, и вершины, из которых не отходит ни одной дуги.

Будем внутренние и висящие вершины дерева нумеровать парой чисел в скобках (ρ, σ), где ρ – есть ранг вершины, а σ – ее порядковый номер среди всех вершин одного и того же ранга (например, слева направо). Начальную вершину будем обозначать парой (0,0). Начальной и внутренней вершине сопоставим элементарные проверки множества П. Дугам дерева, исходящей из некоторой его вершины, сопоставим возможные результаты проверки, представляемой этой вершиной. Начальной вершине поставим в соответствие множество Е возможных технических состояний объекта, а внутренним и висящим вершинам – подмножества технических состояний, получаемые как классы разбиений по результатам соответствующих элементарных проверок. Элементарную проверку и подмножество технических состояний, сопоставляемые вершине (ρ, σ) дерева будем обозначать символами и соответственно.

Из правил построения дерева следует, что объединение множества технических состояний есть множество Е возможных технических состояний. Каждому пути соответствует последовательность элементарных проверок.

Рассмотрим, как дерево представляет алгоритм диагноза. Начальной вершине соответствует элементарная проверка 0π множество *E* всех возможных технических состояний. Элементарная проверка имеет три возможные результата и тем самым разбивает множество *E* на три подмножества $E_{1,1}$, $E_{1,2}$, $E_{1,3}$ не различаемых этой проверкой технических состояний.

Первые два из этих подмножеств соответствуют внутренним вершинам (1,1) и (1,2) и подлежат дальнейшим разбиениям элементарными проверками 1,1π и 2,1π. Третье подмножество соответствует висящей вершине, и поэтому разбиение его на подмножества алгоритмом не предусмотрено. Аналогично можно рассмотреть любую другую вершину дерева. Как только в процессе элементарных проверок будет достигнута висящая верши-на, алгоритм диагноза прекращается. Фактическое техническое состояние объекта принадлежит

подмножеству, соответствующему достигнутой висящей вершине. Каждой конкретной реализации алгоритма диагноза соответствует единственный путь. Например, если фактическое техническое состояние принадлежит подмножеству $E_{3,2}$, то последовательность реализации элементарных проверок будет 0π, 2,1π, 4,2π.

Рассмотрим некоторый ненулевой ранг дерева. В общем случае дерево может иметь несколько внутренних вершин. Это значит, что возможны две разные последовательности реализации элементарных проверок. Обе эти проверки могут являться как одной и той же элементарной проверкой *j*π множества *П*, так и разными элементарными проверками последнего. Если для каждого ранга дерева выполняется условие, состоящее том, что всем внутренним вершинам этого ранга сопоставлена одна и та же элементарная проверка из множества *П*, то алгоритм диагноза называется *безусловным*. Это соответствует заданию одной фиксированной последовательности реализации элементарных проверок из множества *П*, не зависящей от фактического технического состояния объекта. Т.е. выбор или назначение очередной элементарной проверки в последовательности их реализации не зависит от результатов предыдущих уже реализованных элементарных проверок. Если же в дереве найдется хотя бы один ранг с несколькими внутренними вершинами, которым сопоставимы разные элементарные проверки из множества *П,* то алгоритм диагноза называется *условным***.** В условных алгоритмах выбор или назначение некоторых или всех (кроме 0π) элементарных проверок производится с учетом результатов предыдущей уже реализованной элементарной проверки.

Достоинством безусловных алгоритмов является простота проверок, так как требуется хранить лишь состав элементарных проверок и единственную последовательность их реализации. Для условных требуется хранить кроме состава элементарных проверок все признаки безусловных и условных переходов от данной элементарной проверки к следующей, т.е. хранить не одну, а несколько последовательностей реализации элементарных проверок. Безусловные алгоритмы диагноза можно классифицировать по характеру их остановки. Если выдача результатов диагноза предусмотрена только после реализации всех элементарных проверок, то алгоритм является алгоритмом с *безусловной остановкой*. Таким алгоритмам соответствуют деревья, у которых все висящие вершины имеют один и тот же ранг.

Во многих случаях фактическое техническое состояние объекта может быть определенно с требуемой глубиной диагноза прежде, чем будут реализованы все элементарные проверки алгоритма диагноза. Безусловные алгоритмы, у которых предусмотрена возможность выдачи результатов диагноза после реализации каждой элементарной проверки, называются алгоритмами с *условной остановкой*. Характерная особенность – не менее двух висящих вершин, ранги которых различны. Условные алгоритмы являются алгоритмами с условной остановкой. Все указанные типы алгоритмов применяются в системах тестового диагноза. В системах функционального диагноза применяются алгоритмы с условной остановкой, т.к. необходимо немедленно определять неисправное состояния объекта.

Различают аппаратурные, программные и программно-аппаратурные средства диагноза, рис.3.9.

Рис. 3.9. Классификация средств диагноза

Под аппаратурными средствами диагностирования понимается совокупность технических устройств, предназначенных для съема, преобразования, хранения и представления (отображения, документирования) диагностической информации о контролируемых объектах.

Под программными средствами диагностирования понимается специализированное программное обеспечение, прикладные программы предназначенные для обработки, хранения, представления диагностической информации.

В общем случае средства диагностирования позволяет решать следующие задачи технической эксплуатации [8]:

- оценивать техническое состояние оборудования на различных этапах эксплуатации;
- определять место и причину отказа;
- контролировать правильность функционирования оборудования;
- накапливать и анализировать информацию о надежности с целью разработки и реализации мероприятий, направленных на поддержание надежности на заданном уровне, а также с целью прогнозирования технического состояния.

3.3.5. Схемы формирования отказов в системах автоматизации, управления и программно-технических средствах

Если контроль работоспособности объекта дает отрицательный результат, то возникает задача определения места отказа с заданной подробностью (точностью) до съемного блока, съемной платы в блоке, отдельного элемента в схеме. Как правило, процесс поиска места отказа имеет большую длительность и трудоемкость, требует специальных средств диагностирования. Они зависят от того, насколько хорошо построен сам этот процесс, каким выбран алгоритм диагностирования.

Если при эксплуатации оборудования сетей железных дорог или при проверке их работоспособности установлен факт неработоспособности, то чаще всего возникает необходимость в поиске места отказа и выявлении последствий отказа. Опыт эксплуатации свидетельствует, что из перечисленных мероприятий наиболее трудоемким является поиск места отказа. Так, на поиск места отказа в среднем затрачивается до 90 % времени, связанного с проведением всего комплекса мероприятий по отказу.

Под *программой поиска места отказа* понимают заранее составленную и документально оформленную последовательность элементарных проверок (замеров контролируемых параметров) и последовательность анализа результатов элементарных проверок, выполняемых с целью установления причины отказа и отказавших агрегатов.

Из всех возможных вариантов программ всегда имеется такой, который является оптимальным с точки зрения используемого критерия. В качестве критерия оптимальности программы поиска места отказа могут быть использованы:

• суммарное время выполнения необходимых проверок;

• суммарное количество необходимых проверок;

• суммарная стоимость проверок (например, в денежном выражении);

• суммарная стоимость (или суммарная масса) контрольно-поверочной аппаратуры, задействованной для выполнения необходимых проверок.

Один из возможных вариантов классификации программ поиска места отказа представлен на рис. 3.10 [8]. Все типы программ по способу выбора контролируемых параметров и последовательности элементарных проверок условно разграничиваются на две группы: жесткие программы и гибкие программы.

В *жестких программах* последовательность элементарных проверок определяется заранее, и в ходе поиска места отказа не изменяется. Кроме того, заранее должен быть определен и перечень параметров, контролируемых в каждой элементарной проверке. Жесткие программы получили наибольшее распространение в автоматических и в автоматизированных системах контроля.

В *гибких программах* последовательность элементарных проверок определяется в ходе поиска места отказа на основе определенных правил. Кроме того, перечень параметров, контролируемых в каждой элементарной проверке, формируется только после анализа результатов предыдущей элементарной проверки. Таким образом, программа (алгоритм) формируется "гибко", максимально приспосабливаясь к специфике каждого конкретного отказа. Гибкие программы наибольшее распространение получили при поиске места отказа способом технического осмотра (т.е. визуально-инструментально, группой специалистов).

Все типы программ по частоте анализа результатов элементарных проверок условно разграничивают на две группы: *последовательные* программы и *комбинационные* программы.

В *последовательных программах* анализ результатов проводится после каждой элементарной проверки. В *комбинационных программах* – только после завершения всех элементарных проверок, когда проводится единственный обобщающий анализ. Необходимо отметить, что на практике наибольшее распространение получили последовательные программы. Что касается комбинационных программ, то они представлены одним типом прикладной программы – программой на основе метода Синдеева.

Наиболее распространенные программы поиска места отказа условно разграничивают на две группы:

- *гибко-последовательные:* программа по максимуму информации, программа половинного разбиения;
- *жестко-последовательные*: программа по функциональной схеме, программа время-вероятность.

Программа по функциональной схеме основана на поиске места отказа путем выполнения в "жестком" порядке (строго по функциональной схеме отказавшей системы, например, в порядке передачи от элемента к элементу механической нагрузки или в направлении движения жидкости) последовательных элементарных проверок. Результаты каждой элементарной проверки сразу же анализируются.

Рис. 3.10. Классификации программ поиска места отказа

Элементарной проверке подлежит диагностический параметр (параметры) каждого отдельного элемента системы. Поиск места отказа прекращается, как только при анализе результатов очередной элементарной проверки окажется найденным отказавший элемент системы. Очевидно, что в самом неблагоприятном случае (когда отказал последний из проверяемых элемент системы) число элементарных проверок будет максимальным и равным числу элементов в системе.

Достоинства жестких алгоритмов заключаются в простоте и доступности, а также в возможности использования для новой техники, когда не накоплен опыт эксплуатации, и даже когда не накоплены статистические данные по поиску мест ее отказов.

К недостаткам программ с жестким алгоритмам следует отнести: необходимость выполнения большого количества элементарных проверок, что требует больших затрат времени и материальных ресурсов, и необходимость использования при поиске мест отказов эксплуатационной документации (технического описания, инструкции по технической эксплуатации, альбома формулярных схем).

Программа "вероятность – время" может быть использована лишь тогда, когда по отказам данного типа оборудования уже накоплен и систематизирован достаточно большой опыт ее эксплуатации, и, в частности, опыт поиска места отказа. Прежде всего, по каждому элементу системы должны быть известны: вероятность отказа i-го элемента q_i; время, необходимое для элементарной проверки i-го элемента τ_i. Выполнения в "жестком" порядке, т.е. строго по убыванию численных значений отношения q_i / τ_i последовательных элементарных проверок элементов.

Элементарной проверке подлежит диагностический параметр (параметры) каждого отдельного элемента системы. Результаты каждой элементарной проверки сразу же анализируются. Поиск места отказа прекращается, как только при анализе результатов очередной элементарной проверки окажется найденным отказавший элемент системы.

Очевидно, что такая программа позволяет в первую очередь проверять те элементы отказавшей системы, вероятность отказа которых наибольшая, а время на элементарную проверку – наименьшее. В результате этого общее время на выявление места отказа системы оказывается существенно меньше, чем при использовании ранее рассмотренной программы по функциональной схеме.

Программа по максимуму информации может быть использована лишь тогда, когда по отказам оборудования данного типа уже накоплен и систематизирован определенный опыт ее эксплуатации, в частности, когда для каждого элемента системы известны величина вероятности его отказа q_i.

Программа по максимуму информации основана на поиске места отказа путем выполнения в "гибком" порядке последовательных элементарных проверок групп элементов. В ряде случаев в группе может быть и один элемент. В первой элементарной проверке проверяется такая группа смежных элементов, сумма вероятностей отказов которых равна примерно 0,5; 0,25 – для второй; 0,125 – для третьей; 0,0625 – для четвертой и т.д.

Гибкость программы заключается в том, что решение о месте проведения второй и последующих элементарных проверок не известно заранее, а принимается с использованием правила: "в проверяемой группе должен быть отказавший элемент".

Поиск места отказа прекращается, как только при анализе результатов очередной элементарной проверки окажется найденным отказавший элемент. Такая программа позволяет выполнять максимально информативные элементарные проверки, в результате существенно уменьшается как число элементарных проверок, так и общее время поиска места отказа.

Определения ГОСТ Р 27.002-2009 по теме «техническая диагностика»:

Модель безотказности – математическая модель, используемая для прогнозирования или оценки показателей безотказности. *Блок-схема безотказности* – графическое представление изделия в виде блоков, показывающее, как неисправности составных частей и их комбинации влияют на состояние изделия.

Дерево неисправностей – логическая диаграмма, отражающая неисправности составных частей, внешних событий или их комбинаций, приводящих к определенному нежелательному событию.

Анализ дерева событий – индуктивная процедура моделирования возможных результатов, которые могут последовать от данного инициирующего события и состава предусматриваемых контрмер.

Анализ дерева неисправностей – анализ, основанный на логической диаграмме, отражающей неисправности составных частей, внешних событий или их комбинаций, приводящих к определенному нежелательному событию.

Диаграмма состояний-переходов – диаграмма, показывающая совокупность возможных состояний изделия и возможных пошаговых переходов между состояниями.

Прогнозирование – вычислительный процесс, направленный на предсказание значений количественных характеристик.

Самопроверка – обнаружение ошибок непосредственно при выполнении требуемой функции.

Самотестирование – оценка собственного состояния непосредственно при выполнении требуемой функции.

3.3.6. Тестирование программных средств

Под диагностированием программных средств в первую очередь подразумевают тестирование. Тестирование позволяет отыскать ошибки и дефекты ПО, проверить соответствие функций программы ее назначению и предъявляемым требованиям.

Тестирование программного обеспечения – это процесс анализа или эксплуатации программного обеспечения с целью выявления дефектов. Тестирование ПО является необходимым требованием при создании программных средств и относится к одному из способов обеспечения и повышения надежности программных средств на стадии проектирования и производства.

Тестирование программного обеспечения выполняет две базовые функции: верификацию и аттестацию.

Верификация –процедура, которая показывает соответствие результатов конкретной фазы процесса разработки ПО требованиям данной и предшествующих стадий.

Аттестация есть гарантия того, что программный продукт удовлетворяет всем системным требованиям заказчика.

Тестирование может быть статическим или динамическим.

Тестовая деятельность, связанная с анализом результатов разработки ПО, называется *статическим тестированием*. Статическое тестирование может выполнять проверку программных кодов, сквозной контроль и проверку программы даже без запуска на ЭВМ. Такой подход к тестированию иногда отождествляют с тестированием по методу «белого ящика».

При тестировании *«белым ящиком»* известна внутренняя структура программы. Исследуются внутренние элементы программы и связи между ними. Объектом тестирования является внутреннее поведение программы.

Обычно тестирование «белого ящика» основано на анализе управляющей структуры программы. Программа считается полностью проверенной, если проведено исчерпывающее тестирование путей ее графа управления. При этом формируются тестовые варианты, в которых [5]:

- гарантируется проверка всех независимых маршрутов программы;
- проходятся ветви FALSE, TRUE для всех логических решений;
- выполняются все циклы (в пределах их границ и диапазонов);
- анализируется правильность внутренних структур данных.

Недостатки статического тестирования*:*

- количество независимых маршрутов может быть очень велико, поэтому проверка всех маршрутов в графе сложного программного модуля практически невозможна;
- исчерпывающее тестирование маршрутов не гарантирует соответствия программы исходным требованиям к ней;
- в программе могут быть пропущены некоторые маршруты;
- нельзя обнаружить ошибки, появление которых зависит от обрабатываемых данных (например, ошибки в условленных выражениях типа «if ... then ... else»).

Приведем три способа тестирования методом «белого ящика».

Первый способ тестирования базового пути позволяет оценить комплексную сложность программы и использовать эту оценку для определения необходимого количества тестовых вариантов. Тестовые варианты гарантируют выполнение каждого оператора программы при тестировании.

Второй способ тестирования ветвей и операторов отношений, который обеспечивает построение тестовых вариантов для проверки логических условий.

Третий способ тестирования потоков данных, который обеспечивает анализ информационной структуры программы а также проверку работы циклов.

Динамическое тестирование предусматривает эксплуатацию программного продукта с целью проверки выполнения функций системы, иначе этот подход называют *«черным ящиком»*.

При тестировании методом «черного ящика» известны функции, выполняемые системой. Исследуется работа каждой функции на всей области определения. Система представляется объектом с известными входными значениями и выходными результатами, при этом никак не учитывается внутреннее представление системы.

Тестирование методом «черного ящика» демонстрирует как выполняются функции программы; правильно ли как принимаются исходные данные; как вырабатываются результаты.

Исследования показывают, что методики тестирования, основанные на принципах «черного и белого ящиков», должны использоваться вместе. Конечно, тестирование «белого ящика» более трудоемкий процесс, трудно поддающийся автоматизации, но выявляющий многие ошибки ПО.

Принципы тестирования «черного ящика» не являются альтернативой методам «белого ящика», просто они используются на более поздних ступенях тестирования ПО и обнаруживают другие типы ошибок:

- некорректные или отсутствующие функции;
- ошибки интерфейса;
- ошибки во внутренних структурах данных или в доступе к внешней базе данных;
- ошибки характеристик, например, необходимая емкость памяти;
- ошибки инициализации и завершения.

Техника «черного ящика» позволяет сократить число тестовых вариантов, а также выявить целые классы ошибок, а не отдельных ошибок.

В основном используются три способа тестирования методом «черного ящика».

Первый способ разбиения по эквивалентности. В этом способе входная область данных делится на классы эквивалентности, то есть наборы данных с общими свойствами. Для каждого класса данных разрабатывается один тестовый вариант. Классы эквивалентности могут быть определены по спецификации на программу. Тестовый вариант подбирается так, чтобы проверить сразу наибольшее количество свойств класса эквивалентности.

Второй способ анализа граничных значений заключается в получении тестовых вариантов, которые анализируют граничные значения.

Третий способ диаграмм причин-следствий . Этот способ проектирования тестовых вариантов обеспечивает формальную запись логических условий и соответствующих действий, строя тестовые последовательности, которые проверяют причинно-следственные отношения в программных модулях [5].

Процесс тестирования ПО объединяет различные способы тестирования в определенную последовательность шагов, которые приводят к успешному построению программной системы. В начале осуществляется тестирование элементов (программных модулей), проверяющее результаты кодирования ПО. Цель – индивидуальная проверка каждого модуля. Используются способы тестирования «белого ящика».

На втором шаге осуществляется тестирование интеграций, ориентированное на выявление ошибок этапа проектирования ПО. Цель – тестирование сборки модулей в систему. В основном применяют способы тестирования «черного ящика». Используются методы нисходящего и восходящего тестирования интеграций. Проводятся тесты для обнаружения ошибок интерфейса. Например, потеря данных при прохождении через интерфейс или отсутствие в модуле необходимой ссылки, или проблемы при работе с глобальными структурами данных.

Третий шаг заключается в тестировании правильности, проверяющее корректность требований к программной системе. Цель – подтвердить, что функции, описанные в спецификации ПО, отвечают требованиям заказчика. Используются методы «черного ящика». Важным элементом подтверждения правильности является проверка конфигурации программной системы - совокупности всех элементов информации, вырабатываемых в процессе конструирования ПО. При этом используются варианты альфа- и бета-тестирования. Альфа-тестирование проводится заказчиком в организации разработчика. Бета-тестирование, которое длится в течение фиксированного срока, проводится конечным пользователем в организации заказчика.

На заключительном этапе проводится системное тестирование, выявляющее дефекты этапа системного анализа ПО. Цель – проверка правильности взаимодействия всех элементов компьютерной системы, реализации всех системных функций. Используются следующие тесты: тестирование восстановления; тестирование безопасности; стрессовое тестирование; тестирование производительности в системах реального времени.

3.4. Вопросы и задачи для самостоятельной подготовки

1. Какой вид резервирования наиболее распространен и почему?
2. Что такое кратность резервирования?
3. Рассчитайте выигрыш по надежности для системы, состоящей из трех элементов. ВБР элементов известны p_1=0,8; p_2=0,7; p_3=0,6 а) при общем дублировании; б) при общем резервировании кратностью 3; в) при раздельном дублировании элементов.
4. Для задачи №3 рассчитайте выигрыш по наработке системы для трех вариантов.
5. Что такое оперативная продолжительность корректирующего технического обслуживания?
6. Перечислите показатели контролепригодности технических систем.
7. Чем отличаются системы тестовой и функциональной диагностики? В каких случаях эти системы диагностики более эффективны?
8. Какие безусловные алгоритмы поиска неисправностей применимы в АСУ ТП?
9. В чем преимущества и недостатки тестирования ПО методом "черного ящика"?
10. Определите порядок осмотра элементов при диагностике системы время – вероятностным методом. Система состоит из пяти элементов. Известна следующая статистика:

Номер элемента	1	2	3	4	5
Время обнаружения неисправности в элементе	12	5	3	10	5
Вероятность отказа элемента	25	15	10	20	30
Порядок элементов при диагностике системы					

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Острейковский В.А. Теория надежности: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2003.– 463 с.

2. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие.- СПб.: Питер, 2005. – 479 с.

3. Чупин А.В., Ямпольский А.А. Надежность систем управления: умк для студентов заочного обучения специальности 210200. г. Керерово: КТИПП, 2004. – 101 с.

4. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности. Учебник для вузов – М.: Высшая школа, 1977. – 160 с.

5. Шегал А.А. Надежность, эргономика и качество АСОИУ: конспект лекций. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 127 с.

6. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 317 с.

7. Половко А.М. Основы теории надежности: Учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.

8. Сафарбоков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики: учебное пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – 216 с.

9. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматических систем управления: Учебное пособоие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр.отд-ние. 1984. – 208 с.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АВПКО – анализ видов, последствий и критичности отказов
АСУ ТП – автоматизированные системы управления технологическими процессами
КТС – комплекс технических средств
ВО – вероятность отказа
ВБР – вероятность безотказной работы
ИСО – Международная организация по стандартизации
МО – математическое обеспечение
МЭК – международная электротехническая комиссия
ОД – объект диагностирования
ПО – программное обеспечение
ПН – показатель надежности
САУ – система автоматического управления
СД – система (средство) технического диагностирования
ССНТ – система стандартов надежность в технике
ТК – технический комитет
ЭВМ – электронно-вычислительная машина
HMI – Human Machine Interface – человеко-машинный интерфейс
SCADA – Supervisory control and data acquisition – диспетчеризация управления и сбор данных

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список рекомендуемой литературы

1. Александровская Л.Н. Современные методы обеспечения безопасности сложных технических систем. М.: Логос, 2003.– 206 с.
2. Алексеев А.А. Идентификация и диагностика систем: учеб.для студентов вузов.- М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 352 с.
3. Бердичевский Б.Е. Оценка надежности аппаратуры автоматики. Методы оценки надежности в процессе разработки. – М.: Машиностроение, 1966.
4. Бржозовский Б.М. и др. Диагностика и надежность автоматизированных систем: учебник. – М.: ТНТ, 2010.– 380 с.
5. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Высшая школа, 1977. – 193 с.
6. Глазунов Л.П. и др. Основы теории надежности автоматических систем управления: Учебное пособие для вузов – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. Отд-ние, 1984. – 208 с.
7. Дорохов А.Н., Керножицкий В.А. Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем – М.: Из-во "Лань", 2011. - 352 с.
8. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем. – М.: Мир, 1984. – 261с.
9. Надежность автоматизированных систем управления: Учебное пособие для вузов. Под ред. Я.А. Хетагурова. – М.: Высшая школа, 1979. – 287 с.
10. Надежность и диагностика автоматизированных систем [Электронный ресурс]: Курс лекций / авторы-составители Р.Р. Васильев, М.З. Салихов. – М. «МИСИС», 2005. – 92 с.
11. Половко А.М. Основы теории надежности: Практикум: Уч. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.– 557 с.
12. Рябин И.А. и др. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981. – 284 с.
13. Северцев Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке. – М.: Высшая школа, 1989. – 256 с.
14. Схиртладзе А.Г. Надежность и диагностика технологических систем. Новое знание, 2008.– 517 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1

Интенсивность внезапных отказов некоторых элементов

Наименование элементов	Интенсивность внезапных отказов $\lambda*10^{-6}$ $ч^{-1}$
Транзисторы германиевые сплавные (типа П15, П16)	0,8 - 1,0
Транзисторы германиевые сплавные (типа П15, П16)	0,4 - 0,5
Диоды германиевые (типа Д9, Д14)	0,05 - 0,1
Туннельные диоды (типа ЗИ301)	1,3 - 7,3
Резисторы (типа МЛТ, МТ)	0,02 - 0,04
Регулируемые резисторы	2,0
Проволочные резисторы	0,5
Углеродистые резисторы	0,01
Конденсаторы (типа КСО, КТК, КДС)	0,02 - 0,04
Конденсаторы танталовые	0,02
Импульсные трансформаторы на ферритовых кольцах	0,1 - 0,2
Ферриты в ЗУ	0,001 - 0,0001
Кремниевые полупроводниковые интегральные схемы (5-20 элементов)	0,1 - 1,0
Пайки	0,001
Соединение "под винт"	0,08
Соединение накруткой	0,0012
Соединение сваркой	0,0006
Соединение обжимкой	0,006
Разъемный контакт	0,05
Пайка автоматическим способом	0,002
Пайка ручным способом	0,2
Трансформаторы	0,5
Вентиляторы	2,0
Реле	0,5
Переключатели	0,2

Таблица Б.2

Учет условий эксплуатации

Наименование элементов	Значение коэффициента h при действии нагрузки [9]		
	электрическая	тепловая	вибрационная
Транзисторы германиевые (типа П15, П16, П403)	1,2 - 1,4	0,9 - 1,5	0,8
Транзисторы кремниевые	0,5	0,3 - 0,5	—
Диоды германиевые	0,4	0,3 - 0,6	0,5
Диоды кремниевые	—	0,2 - 0,6	—
Резисторы непроволочные	1,2 - 2,0	0,3 - 0,8	0,3
Конденсаторы керамические	3,0	0,5 - 0,85	0,3
Конденсаторы бумажные	2,5 - 4,0	1,2 - 1,6	—
Конденсаторы слюдяные	—	0,8 - 1,1	—
Конденсаторы танталовые электролитические	—	0,5 - 0,6	—
Туннельные диоды (типа ЗИ301)	1,25	1,25	0,5
Кремниевые полупроводниковые интегральные схемы (5-20 элементов)	0,5	0,5	—
Реле	2,3	—	—
Трансформаторы силовые	3,3	1,1	—

Таблица Б.3

Поправочные коэффициенты условий эксплуатации

Условие применения элементов	Значение К [9]
В лабораторных и благоустроенных помещениях	1
В стационарных наземных устройствах	16
В кораблях при монтаже приборов в защищенных отсеках	28
На автоприцепах	36
На железнодорожных платформах	50
В составе бортовых систем, монтируемых на самолетах	120 - 160
В составе бортовых систем, монтируемых на ракетах	700

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Квантили распределения χ^2 при 2k-степенях свободы

	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,41	3,22	4,60	5,99	7,82	9,21	13,82
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	11,67	13,28	18,46
6	0,872	1,134	1,635	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	15,03	16,81	22,5
8	1,646	2,03	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	18,17	20,1	26,1
10	2,56	3,06	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	21,2	23,2	29,6
12	3,57	4,18	5,23	6,30	7,81	9,03	11,34	14,01	15,81	18,55	21,0	24,1	26,2	32,9
14	4,66	5,37	6,57	7,79	9,47	10,82	13,34	16,22	18,15	21,1	23,7	26,9	29,1	36,1
16	5,81	6,61	7,96	9,31	11,15	12,62	15,34	18,42	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0	39,3
18	7,02	7,91	9,39	10,86	12,86	14,44	17,34	20,6	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8	42,3
20	8,26	9,24	10,85	12,44	14,58	16,27	19,34	22,8	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6	45,3
22	9,54	10,60	12,34	14,04	16,31	18,10	21,3	24,0	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3	48,3
24	10,86	11,99	13,85	15,66	18,06	19,94	23,3	27,1	29,6	33,2	36,4	40,3	43,0	51,2
26	12,20	13,41	15,38	17,29	19,82	21,8	25,3	29,2	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6	54,1
28	13,56	14,85	16,93	18,94	21,6	23,6	27,3	31,4	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3	56,9
30	14,95	16,31	18,19	20,6	23,4	25,5	29,3	33,5	36,2	40,3	43,8	48,0	50,9	59,7
32	16,36	17,78	20,07	22,27	25,15	27,37	31,34	35,66	38,47	42,58	46,19	50,49	53,49	62,49
34	17,79	19,28	21,66	23,95	26,94	29,24	33,34	37,80	40,68	44,90	48,60	53,00	56,06	65,25
36	19,23	20,78	23,27	25,64	28,73	31,12	35,34	39,92	42,88	47,21	51,00	55,49	58,62	67,99
38	20,69	22,30	24,88	27,34	30,54	32,99	37,34	42,05	45,08	49,51	53,38	57,97	61,16	70,70
40	22,16	23,84	26,51	29,05	32,34	34,87	39,34	44,16	47,27	51,81	55,76	60,44	63,69	73,40
42	23,65	25,38	28,14	30,77	34,16	36,75	41,34	46,28	49,46	54,09	58,12	62,89	66,21	76,08
44	25,15	26,94	29,79	32,49	35,97	38,64	43,34	48,40	51,64	56,37	60,48	65,34	68,71	78,75
46	26,66	28,50	31,44	34,22	37,80	40,53	45,34	50,51	53,82	58,64	62,83	67,77	71,20	81,40
48	28,18	30,08	33,10	35,95	39,62	42,42	47,34	52,62	55,99	60,91	65,17	70,20	73,68	84,04
50	29,71	31,66	34,76	37,69	41,45	44,31	49,33	54,72	58,16	63,17	67,50	72,61	76,15	86,66

Учебное текстовое электронное издание

Сухоносова Татьяна Геннадьевна
Рябчиков Михаил Юрьевич

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Учебное пособие

Издается полностью в авторской редакции
1,2 Мб
1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2015 год
ФГБОУ ВПО «МГТУ»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра автоматизированных систем управления
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru