**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

**по дисциплине «Надежность линий, систем и сетей»**

**Лекция №1**

|  |  |
| --- | --- |
| **Тема:** | **Введение в теорию надежности** |
| Учебные вопросы: | 1. Основные понятия и определения. 2. Показатели надежности и их классификация. |
|  |  |

**Введение**

Среди инженерных проблем одной из самых древних и важных является проблема обеспечения надежности изготавливаемых орудий машин, сооружений и т. д. Ненадежные изделия никогда никому не были нужны. Крупный военный ученый академик А.И. Берг справедливо подчеркивал: "Ни одно достижение науки и техники, сколь бы эффективно оно ни было, не может быть полноценно использовано, если его реализация будет зависеть от "капризов" малонадежной аппаратуры".

В разные годы по-разному стремились решить проблему надеж­ности. Но долгое время основным путем обеспечения требуемой надежности было увеличение запаса прочности (механической, элект­рической и т.д.) изготавливаемых изделий.

По-настоящему проблемой надежности ученые вынуждены были за­няться в конце 40-х годов в связи с резким усложнением радиоэлектронной аппаратуры. Наличие большого числа элементов, из которых состоит аппаратура, привело тому, что системы, вы­полняющая ответственнейшие функции, практически переставали быть работоспособными. Так, по статистическим данным США тех лет, в неработоспособном состоянии радиолокационная аппаратура находилась 84% времени эксплуатации, морская радиоэлектронная –70%, гидроакустическая – 48%, а менее сложная связная - 14% времени эксплуатации. Такое положение не могло не вызвать серьезной тревоги.

В начале 50-х годов началось широкое наступление на проблему надежности. Решением этой проблемы занимались как зарубежные, так и советские ученые.

В нашей стране большой вклад в решение проблемы надежности внесли академики Берг А.И, и Бруевич Н.Г., украинский академик Гнеденко Б.В., член-корреспондент АН России Сифонов В.И., доктор технических наук Бердичевский Б.Е. и другие.

Трудами русских и зарубежных ученых была сформирована новая научная дисциплина "Теория надежности".

Уже в 1960 г отмечено, что надежность аппаратуры увеличилась со времени второй мировой войны в 50 раз, а с 1950 года – в 10 раз.

Проблема надежности является "вечной" проблемой. Решенная сегодня, она завтра возникнет с новой силой в связи с бурным развитием техники. Так широкое внедрение цифровых вычислительных машин в системы вооружения заставило посмотреть на эту проблему с новой стороны. Применение ЭВМ позволило существенно увеличить объем задач, решаемых автоматически, с целью получения необходимых для ведения боя данных. Но это значительно повысило требования кдостоверности этих данных, а следовательно, и надежности машин. ЭВМ обладает огромными логическими возмож­ностями, что дает необходимые предпосылки для самоконтроля и контроля работоспособности узлов, устройств, приборов на всех этапах применения боевого оружия.

Эти, а также некоторые другие особенности сложных технических систем с ЭВМ поставили перед теорией надежности новые проб­лемы.

Наиболее ощутима проблема надежности при выполнении ответс­твенных операций, в которых недостаточная надежность может при­вести к гибели людей или значительному материальному ущербу. Падение самолетов, разрушение мостов и зданий, катастрофа Чер­нобыльской АЭС - все это во многом связано с просчетами в оценке надежности.

Но повышение надежности влияет на экономические показатели объекта, т.к. требуют дополнительных затрат. При этом затраты на этапе разработки" и производства с учетом более надежных конструктивных решений могут быть только частично снижены на этапе эксплуатации объекта (затраты на ремонт, запасные части). Поэтому не всякое повышение надежности является целесо­образным.

Каждый объект имеет свой оптимальный уровень надежности, при котором выполняются заданные функции при минимальных экономических затратах. Оптимальную надежность можно найти, если ис­пользовать количественные методы оценки надежности, которые мы будем с вами изучать.

**Вопрос №1.** **Основные понятия и определения**

# Основные понятия, термины и определения теории надежности приведены в ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения

Для понимания терминологии, приведенной в ГОСТ, рассмотрим некоторые дополнительные термины, такие как *объект, система, элемент.*

**Объект** - это предмет определенного целевого назначения, рассматриваемый в периоды проектирования, производства и эксплуатации на надежность.

Объектами могут быть сооружения, установки, технические изделия, машины, агрегаты и их части, отдельные детали.

**Система** *-* это объект, представляющий собой совокупность эле­ментов, взаимодействующих в процессе выполнения определенного круга задач и взаимосвязанных функционально.

**Элемент** представляет собой простейшую часть системы, отдельные части которой в рамках рассмотрения на надежность не представляют самостоятельного интереса.

Понятия "система" и "элемент" выражены друг через друга. Эти понятия относительны: объект, считавшийся системой в одном исс­ледовании на надежность, может рассматриваться как элемент, если изучается объект большего масштаба.

Деление системы на элементы зависит от характера рассмотре­ния (функциональные, конструктивные, схемные элементы), от требуемой глубины исследования, от характера объекта и т.д.

**Сложная система** – это такой объект, который, имея самостоя­тельное функциональное значение, может быть подразделен на несколько подсистем, при совместном действии которых выполняются функции, стоящие перед объектом.

В современной науке понятие "сложная система" используется очень широко, и оно распространяется не только на технические объекты. Чтобы подчеркнуть ограниченность круга рассматриваемых в данной дисциплине вопросов только рамками технических объектов, мы используем термин "сложные технические системы".

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Общие понятия теории надежности** | | | | |
| **Надежность** | | | Свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.  Примечание. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать **безотказность, ремонтопригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность** или определенные сочетания этих свойств | |
| **Свойства надежности:** | | | | |
| **Безотказность** | | | Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки | |
| **Долговечность** | | | Свойство объекта, заключающееся в его способ-  ности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния. | |
| **Ремонтопригодность**  **Восстанавливаемость:** | | | Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта  Свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта | |
| **Сохраняемость**  **Готовность** | | | Свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования.  Свойство объекта, заключающееся в его способности находиться в состоянии, в котором он может выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта в предположении, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены. | |
| Во время эксплуатации технические системы подвергаются, действию целого ряда внешних и внутренних факторов. В результате этих воздействий отдельные элементы изменяют свои параметры или выходят из строя, что приводит к изменению состояния системы в целом.  **Различают следующие состояния объекта:** | | | | |
| **Исправное** **состояние**  *Исправность* | | | Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации | |
| **Неисправное** **состояние**  *Неисправность* | | | Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации | |
| **Работоспособное** **состояние**  *Работоспособность* | | | Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации | |
| **Неработоспособное** **состояние**  *Неработоспособность* | | | Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.  Примечание. Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции | |
| **Предельное** **состояние** | | | Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно | |
| **Критерий** **предельного** **состояния** | | | Признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией.  Примечание. В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния. | |
| Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации объекта. При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, уничтожен или передан для применения не по назначению. Если критерий предельного состояния установлен из соображений безопасности хранения и (или) транспортирования объекта, то при наступлении предельного состояния хранение и (или) транспортирование объекта должно быть прекращено. В других случаях при наступлении предельного состояния должно быть прекращено применение объекта по назначению.  Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух видов. Первый вид совпадает с неработоспособным состоянием. Второй вид предельного состояния обусловлен тем обстоятельством, что начиная с некоторого момента времени дальнейшая эксплуатация еще работоспособного объекта оказывается недопустимой в связи с опасностью или вредностью эксплуатации. Переход неремонтируемого объекта в предельное состояние второго вида происходит до потери объектом работоспособности.  Для ремонтируемых объектов выделяют два или более видов предельных состояний. Например для двух видов предельных состояний требуется отправка объекта в средний или капитальный ремонт, т. е. временное прекращение применения объекта по назначению. Третий вид предельного состояния предполагает, окончательное прекращение применения объекта по назначению. Критерии предельного состояния каждого вида устанавливаются нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) и (или) эксплуатационной документацией.  ГОСТом основные состояния и события объектов эксплуатации сводятся в схему, приведенную на Рис.1. На указанной схеме : 1- повреждение ; 2- отказ ; 3- переход объекта в предельное состояние из-за неустранимого нарушения требований безопасности, не допустимого снижения эффективности эксплуатации, морального старения и других факторов; 4- восстановление; 5- ремонт.      Рис. 1 Основные состояния объектов  Переход системы из неработоспособного состояния в работоспособное осуществляется за время восстановления  являющегося случайной величиной, так как заранее предусмотреть и определить характер и состав мероприятий по восстановлению заданного уровня тактико-технических показателей РЭО, являющегося сложной системой, затруднительно. Возникает в связи с этим вопрос о сущности обратного перехода - из работоспособного состояния в неработоспособное. Это также случайный процесс, определяемый некоторым временем Т, представляющим собой наработку между отказами. | | | | |
| Переход объекта из исправного состояния в неисправное происходит в результате *повреждения* или *отказа*. | | | | |
| **Повреждение** | | | Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния | |
| **Отказ** | | | Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта | |
| **Критерий** **отказа** | | | Признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации | |
| **Критичность** **отказа** | | | Совокупность признаков, характеризующих последствия отказа.  Примечание. Классификация отказов по критичности (например по уровню прямых и косвенных потерь, связанных с наступлением отказа, или по трудоемкости восстановления после отказа) устанавливается нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией по согласованию с заказчиком на основании технико-экономических соображений и соображений безопасности | |
| **Классификация отказов** | | | | |
| **По степени нарушения работоспособности объекта** | | | | |
| **Ресурсный отказ** | | | Отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния | |
| **Полный отказ** | | | Полная потеря работоспособности | |
| **Частичный отказ** | | | Частичная потеря работоспособности | |
| **По связи между собой** | | | | |
| **Независимый отказ** | | | Отказ, не обусловленный другими отказами | |
| **Зависимый отказ** | | | Отказ, обусловленный другими отказами | |
| **По скоротечности наступления** | | | | |
| **Внезапный отказ** | | | Отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта | |
| **Постепенный отказ** | | | Отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта | |
| **По характеру устранения** | | | | |
| **Сбой** | Самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора | | | |
| **Перемежающийся отказ** | Многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера | | | |
| **Устойчивый отказ** | Обусловлен необратимыми нарушениями характеристик отдельных элементов объекта. Для устранения устойчивого отказа требуются специальные меры (ремонт, регулировка, замена отказавшего элемента). | | | |
| **По характеру проявления** | | | | |
| **Явный** **отказ** | Отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению | | | |
| **Скрытый** **отказ** | Отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики | | | |
| **По причине возникновения** | | | | |
| **Конструктивный отказ** | | Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования | | |
| **Производственный** **отказ** | | Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии | | |
| **Эксплуатационный** **отказ** | | Отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации | | |
| **Деградационный отказ** | | Отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления в эксплуатации | | |
| Рассмотрим некоторые временные понятия | | | | |
| **Наработка** | | | | Продолжительность или объем работы объекта.  Примечание. Наработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т. п.). |
| **Наработка до отказа** | | | | Наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа |
| **Наработка между отказами (наработка на отказ)** | | | | Наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа |
| **Время восстановления** | | | | Продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта |
| **Ресурс** | | | | Суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние |
| **Срок службы** | | | | Календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние |
| **Срок сохраняемости** | | | | Календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции.  Примечание. По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтопригодности, установленным нормативно-технической документацией на объект |
| **Остаточный ресурс** | | | | Суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.  Примечание. Аналогично вводятся понятия остаточной наработки до отказа, остаточного срока службы и остаточного срока хранения |
| **Назначенный ресурс** | | | | Суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния |
| **Назначенный срок службы** | | | | Календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния |
| **Назначенный срок хранения** | | | | Календарная продолжительность хранения, при достижении которой хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.  Примечание. По истечении назначенного ресурса (срока службы, срока хранения) объект должен быть изъят из эксплуатации и должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей нормативно-технической документацией - направление в ремонт, списание, уничтожение, проверка и установление нового назначенного срока и т. д. |

**Вопрос №2 Показатели надежности и их классификация.**

В теории надежности существует два направления:

- первое – **обеспечение надежности** объектов;

- второе – **расчет (контроль) достигнутого уровня надежности.**

Первое направление основано на конструкторских и технологических методах создания высококачественных объектов и правильной их эксплуатации.

Второе направление основано на использовании специальных математических методов.

Оба направления важны и тесно связаны. Одними из важнейших инструментов обоих направлений являются **показатели надежности,** которые позволяют количественно оценивать надежность различных объектов, сравнивать их между собой, исследовать влияние различных факторов, обосновывать требования к надежности и решать многие другие теоретические и практические задачи.

|  |  |
| --- | --- |
| **Показатель надежности** | Количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта |

Выбор показателей надежности проводится в соответствии со свойствами и назначением объекта, условиями его эксплуатации, задачами определения надежности.

К показателям надежности относят количественные характеристики надежности, которые вводят согласно правилам статистической теории надежности. Область применения этой теории ограничена крупносерийными объектами, которые изготавливают и эксплуатируют в статистически однородных условиях и к совокупности которых применимо статистическое истолкование вероятности. Примером служат массовые изделия машиностроения, электротехнической и радиоэлектронной промышленности.

Применение статистической теории надежности к уникальным и малосерийным объектам ограничено. Эта теория применима для единичных восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов, в которых в соответствии с нормативно-технической документацией допускаются многократные отказы, для описания последовательности которых применима модель потока случайных событий. Теорию применяют также к уникальным и малосерийным объектам, которые в свою очередь состоят из объектов массового производства. В этом случае расчет показателей надежности объекта в целом проводят методами статистической теории надежности по известным показателям надежности компонентов и элементов.

Методы статистической теории надежности позволяют установить требования к надежности компонентов и элементов на основании требований к надежности объекта в целом.

Статистическая теория надежности является составной частью более общего подхода к расчетной оценке надежности технических объектов, при котором отказы рассматривают как результат взаимодействия объекта как физической системы с другими объектами и окружающей средой . Так при проектировании строительных сооружений и конструкций учитывают в явной или неявной форме статистический разброс механических свойств материалов, элементов и соединений, а также изменчивость (во времени и в пространстве) параметров, характеризующих внешние нагрузки и воздействия. Большинство показателей надежности полностью сохраняют смысл и при более общем подходе к расчетной оценке надежности. В простейшей модели расчета на прочность по схеме "параметр нагрузки - параметр прочности" вероятность безотказной работы совпадает с вероятностью того, что в пределах заданного отрезка времени значение параметра нагрузки ни разу не превысит значение, которое принимает параметр прочности. При этом оба параметра могут быть случайными функциями времени.

*На стадии проектирования и конструирования показатели надежности трактуют как характеристики вероятностных или полувероятностных математических моделей создаваемых объектов.*

*На стадиях экспериментальной отработки, испытаний и эксплуатации роль показателей надежности выполняют статистические оценки соответствующих вероятностных характеристик.*

*Показатели надежности вводят по отношению к определенным режимам и условиям эксплуатации, установленным в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.*

В качестве показателей надежности используют вероятности случайных событий и числовые характеристики случайных величин, поскольку число отказов, время их наступления и восстановления, работоспособность объектов зависят от многих случайных факторов.

*Классификация показателей надежности представлена в таблице №2*

Таблица № 1.1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№п/п** | **Классификационный признак** | **Показатель надежности** |
| 1. | Тип объекта исследования надежности | Показатели надежности невосстанавливаемых объектов  Показатели надежности восстанавливаемых объектов |
| 2. | Количество характеризуемых свойств надежности | Единичный показатель надежности  Комплексный показатель надежности |
| 3. | Способ получения | Расчетный показатель надежности  Экспериментальный показатель надежности  Эксплуатационный показатель надежности  Экстраполированный показатель надежности |

Поясним проведенную классификацию

При разработке математических моделей оценки показателей надежности различных объектов, они подразделяются на две группы: *невосстанавливаемые объекты и восстанавливаемые объекты.*

|  |  |
| --- | --- |
| **Восстанавливаемый объект** | Объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной)) документации |
| **Невосстанавливаемый объект** | Объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации |

Каждая группа объектов характеризуется своими показателями надежности, которые могут быть как едиными для обеих групп, так и специальными (например, вероятность безотказной работы – единый показатель, параметр потока отказов – показатель только для восстанавливаемых объектов)

Поясним указанные ранее виды показателей надежности.

|  |  |
| --- | --- |
| **Единичный показатель надежности** | Показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта |
| **Комплексный показатель надежности** | Показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность объекта |
| **Расчетный показатель надежности** | Показатель надежности, значения которого определяются расчетным методом |
| **Экспериментальный показатель надежности** | Показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний |
| **Эксплуатационный показатель надежности** | Показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации |
| **Экстраполированный показатель надежности** | Показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации |

Основные единичные показатели надежности приведены в таблице №2.2

Таблица № 1.2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№п/п** | **Свойство надежности** | **Единичный показатель надежности** |
| 1. | Безотказность | Вероятность безотказной работы  Средняя наработка до отказа  Гамма-процентная наработка до отказа  *Средняя наработка на отказ*  Интенсивность отказов  *Параметр потока отказов* |
| 2. | Долговечность | Средний ресурс  Гамма-процентный ресурс  Назначенный ресурс  Средний срок службы  Гамма-процентный срок службы  Назначенный срок службы |
| 3. | Ремонтопригодность | *Вероятность восстановления в заданное время*  *Среднее время восстановления*  *Интенсивность восстановления* |
| 4. | Сохраняемость | Средний срок сохраняемости  Гамма-процентный срок сохраняемости |

*Примечание:* курсивом в таблице выделены показатели, применимые только для восстанавливаемых объектов.

Основные комплексные показатели надежности, *характеризующие надежность восстанавливаемых объектов,* приведены в таблице №2.3

Таблица № 1.3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№п/п** | **Свойство надежности** | **Комплексный показатель надежности** |
| 1. | Безотказность и ремонтопригодность | Коэффициент готовности  Коэффициент оперативной готовности  Коэффициент простоя  Коэффициент технического использования |

Для оценки надежности **невосстанавливаемых** объектов используют в качестве показателей вероятностные характеристики наработки до отказа (времени безотказной работы), которая представляет собой случайную величину T.

Поэтому одной из задач теории надежности является определение закона распределения наработки.

Справочная информация

|  |  |
| --- | --- |
| **ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ** | |
| **Вероятность безотказная работы** | Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет |
| **Гамма-процентная наработка до отказа** | Наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью , выраженной в процентах |
| **Средняя наработка до отказа** | Математическое ожидание наработки объекта до первого отказа |
| **Средняя наработка на отказ** | Отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки |
| **Интенсивность отказов** | Условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник |
| **Параметр потока отказов** | Отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки |
| **Осредненный параметр потока отказов** | Отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки. |
| **ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ** | |
| **Гамма-процентный ресурс** | Суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью , выраженной в процентах |
| **Средний ресурс** | Математическое ожидание ресурса |
| **Гамма-процентный срок службы** | Календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью , выраженной в процентах |
| **Средний срок службы** | Математическое ожидание срока службы. |
| **ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ** | |
| **Вероятность восстановления** | Вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение |
| **Гамма-процентное время восстановления** | Время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью , выраженной в процентах |
| **Среднее время восстановления** | Математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа |
| **Интенсивность восстановления** | Условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено |
| **Средняя трудоемкость восстановления** | Математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа. |
| **ПОКАЗАТЕЛИ СОХРАНЯЕМОСТИ** | |
| **Гамма-процентный срок сохраняемости** | Срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью , выраженной в процентах |
| **Средний срок сохраняемости** | Математическое ожидание срока сохраняемости |
| **КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ** | |
| **Коэффициент готовности** | Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается |
| **Коэффициент оперативной готовности** | Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени |
| **Коэффициент технического использования** | Отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период |
| **Коэффициент сохранения эффективности** | Отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение тою же периода не возникают |

**Лекция №2**

|  |  |
| --- | --- |
| **Тема:** | **Показатели надежности невосстанавливаемых объектов** |
| Учебные вопросы: | 1.Основные показатели безотказности.  2.Основные законы распределения времени наработки до отказа. |
|  |  |

Вопрос №1 Основные показатели безотказности.

**Вероятность безотказной работы, вероятность отказа**

|  |  |
| --- | --- |
| **Вероятность безотказная работы** | Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет |

*Вероятность безотказной работы* выражается формулой

 (2.1)

где *Т* - время непрерывной безотказной работы РЭА от начала работы до первого отказа; *t* - время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы; *P(t)-* вероятность безотказной работы в течение времени *t*; *P(T>t)-* вероятность события, состоящего в том, что *T>t.*

*Изменение вероятности безотказной работы во времени называют функцией надежности.* Типичная функция надежности показана на рис. 1. Функция надежности характеризуется следующими свойствами:

1. функция *P(t)* - не возрастающая;
2. 0≤*P(t)*≤1*;*
3. 

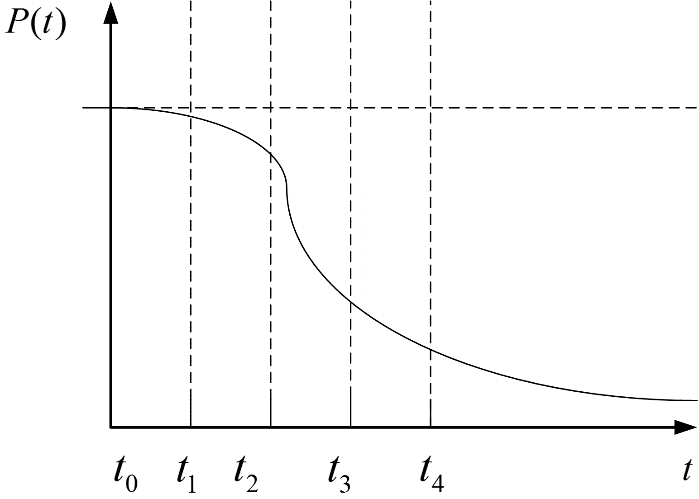


Рис 1. Функция надежности

Статистическая оценка вероятности безотказной работы выражается формулой

 (2.2)

где *N0*- количество изделий, поставленных на испытания; *n(t)* количество отказавших изделий к заданному времени *t*.

При увеличении числа испытываемых изделий *N0*  статистическая оценка *P\*(t)* стремится к вероятности *P(t).*

*Функцию надежности можно построить экспериментальным путем.* Для этого (рис. 2):

* период испытаний группы изделий разделяется на малые равные интервалы времени ;
* в процессе испытаний фиксируется количество отказавших изделий  в каждом интервале времени ;
* по полученным данным определяется статистическая оценка вероятности безотказной работы для каждого интервала

 , (2.3)

где - число изделий, отказавших к концу *i* -го интервала.

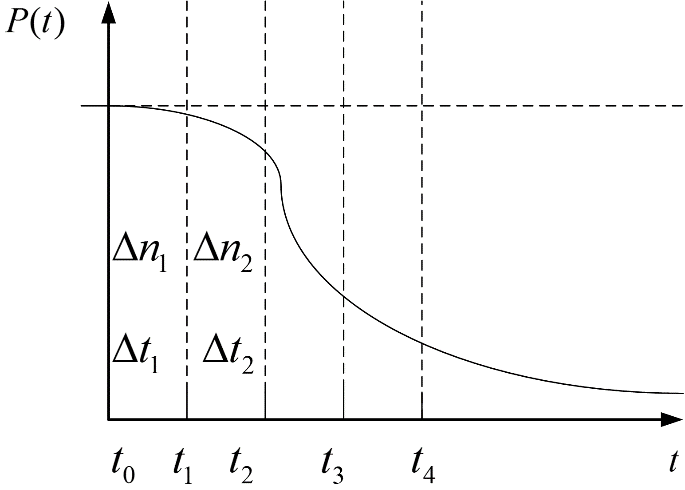


Рис. 2 – Экспериментальное определение функции надежности

*Вероятность отказа* *q(t)*- вероятность того, что в заданном интервале времени произойдет хотя бы один отказ

 (2.4)

Изменение вероятности *q(t)* от времени является *функцией распределе­ния времени безотказной работы* *Т* (интегральным законом распределения), которая обозначается  т.е.

 (2.5)

Отказ на интервал *t* и событие, состоящее в отсутствии отказов на интервале *t*, составляют полную группу событий, поэтому

 (2.6)

*Производная от функции распределения есть плотность распределения* *f(t) времени работы РЭА до первого отказа (дифференциальный закон распределения)*

 (2.7)

Статистическая вероятность отказа определяется формулой

 (2.8)

По аналогии с вероятностью безотказной работы *экспериментальным путем можно построить функцию распределения (рис. 3).* Используя данные измерений, для каждого интервала времени можно определить статистическую оценку функции распределения

 (2.9)

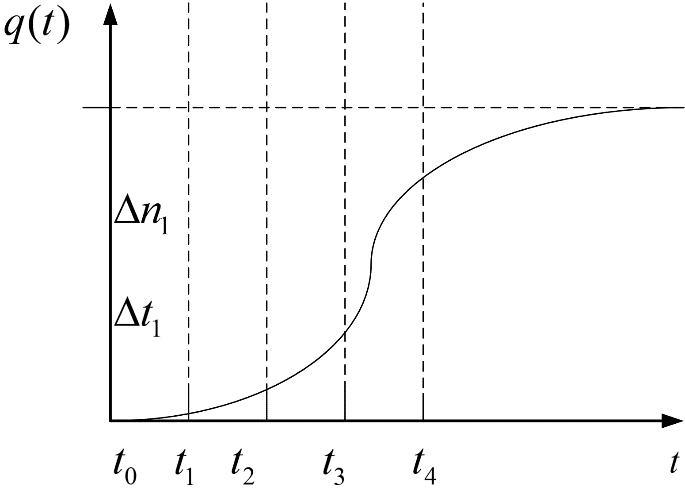
****

Рис. 3 – Экспериментальное определение функции распределения

**Частота отказов**

*Частотой отказов* называется статистическая оценка плотности вероятности работы РЭА до первого отказа.

Частота отказов на интервале  определяется формулой

 (2.10)

где *N0* - количество изделий, поставленных на испытание; *Δni* - количество изделий, отказавших в интервале *Δti.*

Чем больше объем испытаний и меньше интервал времени *Δti.* тем ближе функция  приближается к функции .

Рассмотрим вид кривой плотности распределения наработки до отказа f(t), полученной на основании обработки многочисленных опытных данных (рис 4).

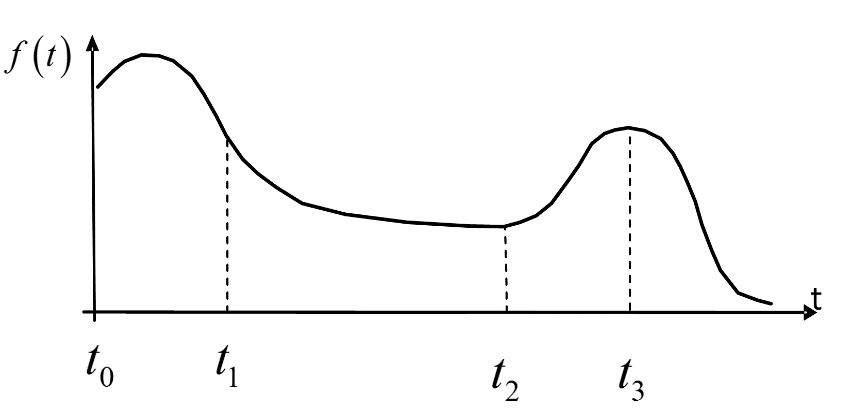


Рис. 4 – Плотность распределения наработки до отказа

На рассматриваемой кривой выделим три характерных периода:

**I Период приработки**

За период 0<t≤t1 величина f(t) сначала растет, а затем резко снижается. Это объясняется проявлением в этот период приработочных отказов т.е., как правило, сложные объекты, имеющие большое число элементов, выходят из строя из-за скрытых дефектов производства, которые, как правило, обнаруживаются в период начальной эксплуатации.

Здесь же могут возникать ошибки операторов, осваивающих новую технику.

Если элементы объекта проходят предварительную тренировку, то первый период может отсутствовать. С этой целью проводится приработка объектов в заводских условиях и выбраковка наиболее слабых элементов, операторов обучают на тренажерах, а затем допускают к эксплуатации техники.

Первый период не продолжителен и составляет несколько десятков, реже – сотни часов.

**II** период - **период нормальной эксплуатации**.

Наиболее продолжительный период, значение f(t) медленно снижается. Надежность здесь обеспечивается правильной и своевременной организацией регламентных работ, техническим обслуживанием. В этот период действуют, в основном, внезапные отказы.

**III** период **износа и старения** в интервале t2≤t≤t3 к внезапным отказам добавляются отказы из-за износа и старения деталей.

При t>t3 вновь наблюдается резкое уменьшение f(t), объясняющееся уменьшением количества работающих систем в этот период.

Выявление и анализ III периода представляет значительный интерес для оценки долговечности систем, обоснования срока их службы.

Установим связь плотности распределения с вероятностью безотказной работы *P(t)* и вероятностью отказов *q(t).* Поскольку  то

 (2.11)

и

 (2.12)

Интеграл от плотности вероятности за время от  до  равен единице

.

Из (2.12) следует

 (2.13)

или 

Таким образом, функция частоты отказов  есть производная от функции надежности *P(t)*, взятая с обратным знаком, то есть *частота отказов характеризует скорость снижения надежности во времени*. Она характеризует надежность тех объектов, которые работают до первого отказа, и после отказа не восстанавливаются.

**Интенсивность отказов**

*Интенсивность отказов* - это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не наступил

 (2.14)

Статистическая оценка интенсивности отказов определяется формулами

 (2.15)

где - количество изделий, оставшихся исправными к началу

интервала *Δti.*

Из (2.15) следует, что *интенсивность отказов* - это отношение количества отказавших изделий в единицу времени к количеству изделий, оставшихся исправными к данному моменту времени при условии, что отказавшие изделия не восстанавливаются и не заменяются исправными.

Другое определение– *интенсивность отказов* – это число отказов в единицу времени, приходящееся на одно исправное изделие в момент времени .

Таким образом, интенсивность отказов показывает, какая доля от рабо­тающих в некоторый момент времени изделий отказывает в единицу времени после этого момента.

График функции *λ(t)* представлен на рис. 5. Функцию *λ(t)* иногда называют лямда-характеристикой.

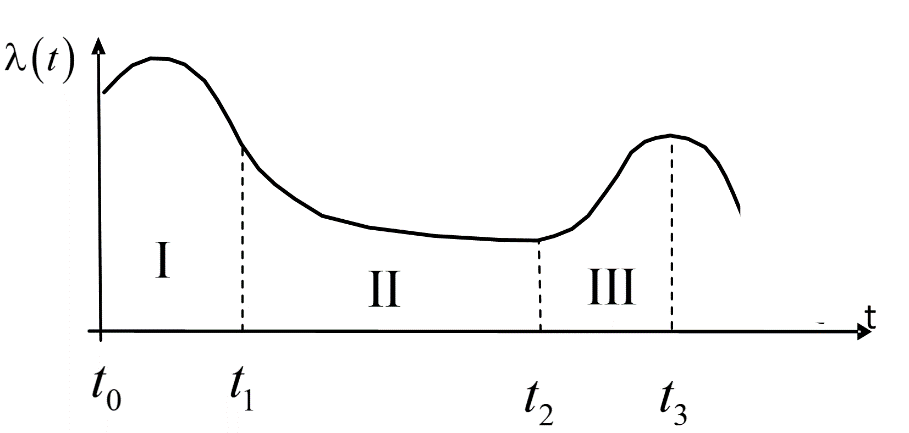


Рис. 5 Функция интенсивности отказов

Лямбда-характеристика имеет три характерных участка. Первый участок

от 0 до tп характеризуется увеличением количества отказов из-за выхода из строя изделий с дефектами, обусловленными ошибками проектирования и про­изводства и носит название периода приработки РЭА.

Второй участок tп – tн называется периодом нормальной эксплуатации. Он характеризуется сравнительно небольшой частотой отказов. Не следует думать, что уменьшение частоты отказов к концу этого периода означает повышение надежности. Снижение частоты отказов объясняется тем, что число изделий, оставшихся исправными, с течением времени убывает, а отказавшие изделия не заменяются и не восстанавливаются, и, следовательно, уменьшается абсолютное число изделий.

Продолжительность этого периода зависит от срока службы изделий и условий эксплуатации. Он составляет обычно десятки тысяч часов и характеризует долговечность РЭА. В этом периоде работы преобладают внезапные отказы.

Третий участок t > tH характеризуется новым ростом числа отказов, что обусловливается износом и старением изделий и носит название: период износа и старения Обычно момент времени *t*H определяет срок службы изделия. В этом периоде работы преобладают постепенные отказы

Установим связь между величинами *λ(t),* *P(t)* и . Из равенства следует

 (2.16)

Это выражение является дифференциальным уравнением с разделяющимися переменными:



Проинтегрировав обе части равенства (2.16) на интервале [0,t], получим

 (2.17)

Поэтому вероятность безотказной работы связана с интенсивностью отказов следующей аналитической зависимостью:

 (2.18)

С учетом (2.16) частота отказов определяется выражением

 (2.19)

При *λ(t)=λ=const, что характерно для этапа нормальной эксплуатации,* выражения для вероятности безотказной работы и частоты отказов упрощаются:

 . (2.20)

Выражение  получило название ***основной закон надежности.***

Интенсивность отказов является показателем, наиболее полно характеризующим надежность невосстанавливаемых изделий, в частности типовых элементов радиоэлектронной аппаратуры.

**Ресурс надежности, средняя наработка до отказа**

За меру ресурса, выработанного изделием в интервале [0,*t*], принимается интеграл

 (2.21)

Ресурс, выработанный изделием в интервале [*ti-1*,*ti*], определяется интегралом

 (2.22)

*Средней наработкой до отказа* называется математическое ожидание времени работы изделия до первого отказа

 (2.23)

Учитывая, что  выражение (7.23) представим в виде

 (2.24)

Обозначая *U=t* и интегрируя (2.24) по частям, получим

 (2.25)

Так как при  *P(t)* стремится к нулю быстрее, чем , то  тогда окончательно получим

 (2.26)

Если *λ(t)= λ*, то, учитывая (2.26), получим

 (2.27)

Статистическая оценка средней наработки на отказ определяется формулой

 (2.28)

где *No* - число испытываемых элементов (изделий); *ti*, - время работы *i*-го элемента до первого отказа.

**Вопрос №2**

В теории надежности приходится иметь дело с двумя классами случайных величин – дискретными и непрерывными. Примеры дискретных случайных величин: число отказов или число восстановлений объекта за заданное время. Примеры непрерывных случайных величин: наработка объекта до отказа, наработка объекта между двумя отказами, время восстановления, ресурс. Учитывая, что в качестве показателей надежности на практике часто используют непрерывные случайные величины, рассмотрим наиболее широко применяемые при расчете надежности законы распределения.

Проиллюстрируем применение законов распределения для описания показателей надежности на примере плотности распределения времени наработки до отказа.

*При раздельном изучении поведения плотности распределения наработки до отказа на отдельных периодах используют различные непрерывные распределения.*

Для периодов I и III используются усеченные распределения

fус(t)=Cf(t),

где C – нормирующий множитель (C≥1); f(t) – функция плотности усекаемого распределения.

Множитель C находится из условия (для I периода).



Для II периода используют показательное распределение.

Применять различные распределения для рассмотренных периодов не совсем удобно. Поэтому нашли широкое применение универсальные законы распределения. Например, для периодов I – III используют распределение Вейбулла-Гнеденко.

Рассмотрим обобщенные сведения по некоторым законам распределения.

Предварительно напомним некоторые сведения из теории вероятностей:

1. *Функцией распределения* случайной величины  называется вероятность того, что она примет значение меньшее, чем заданное :

.

1. *Плотностью распределения (или плотностью вероятности)* непрерывной случайной величины  в точке  называется производная её функции распределения в этой точке

.

Таблица 2.1 – Законы распределения

| **Название закона распределения**  **(обозначение)** | **Плотность распределения** | **Функция распределения** | **Вид плотности распределения** | **Случаи использования** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Экспоненциальное |  |  | Описание: C:\Users\Warlock\Pictures\НЭУ\9.jpg | Для анализа объектов, прошедших период приработки ( период II) |
| Нормальное |  | ,  , | Описание: C:\Users\Warlock\Pictures\НЭУ\4.jpg | Для описания постепенных отказов или для III периода эксплуатации, когда наступают старение и износ. |
| Усеченное нормальное  Примечание: отличие от нормального закона в области определения |  |  |  | Для описания постепенных отказов или для III периода эксплуатации, когда наступают старение и износ. |
| Вейбулла  параметр формы:  параметр масштаба | ,    Примечание: при  распределение Вейбулла превращается в экспоненциальное с параметром |  | Описание: C:\Users\Warlock\Pictures\НЭУ\7.jpg | Для анализа объектов как в период приработки, так и на нормальном этапе эксплуатации |

**Лекция №3**

|  |  |
| --- | --- |
| **Тема:** | **Показатели надежности восстанавливаемых объектов** |
| Учебные вопросы: | 1. Единичные показатели надежности. 2. Комплексные показатели надежности. 3. Расчет надежности восстанавливаемых объектов с использованием теории Марковских процессов. |

**Вопрос №1 Единичные показатели надежности.**

**В процессе эксплуатации сложных технических систем, к которым мы относим и РТС и РЭО, их элементы в случайные моменты могут выходить из строя, т.е. отказывать.**

Для лучшего изучения явления возникновения отказов в теории надежности элементы сложных систем разделяют на две большие группы: *невосстанавливаемые*, т.е. работающие до первого отказа и *восстанавливаемые*, которые после отказа подлежат восстановлению – ремонту.

Ранее мы рассмотрели методы оценки надежности невосстанавливаемых элементов, сегодня мы приступаем к рассмотрению моделей надежности восстанавливаемых элементов и систем и методов оценки их надежности.

Процесс эксплуатации восстанавливаемого объекта можно определить в виде последовательности случайных интервалов времени, в течение которых он находится в рабочем состоянии ,затем в случайный момент времени t01 наступает отказ. Для восстановления после первого отказа требуется случайное время . В момент времени  отремонтированный объект начинает эксплуатацию и продолжает работать случайный интервал времени  до момента второго отказа t02 и т.д. (см. рис. 1).

Такая модель функционирования свидетельствует, что для полной характеристики поведения восстанавливаемых систем следует рассмотреть свойства следующих 3-х случайных величин:

* случайного времени безотказной работы;
* случайного времени восстановления;
* случайного числа отказов за заданное время t.

Первые две случайные величины (СВ) это непрерывные СВ, третья - дискретная СВ.

В этом коренное отличие методов оценки надежности восстанавливаемых систем.

Свойства случайного времени безотказной работы мы подробно рассмотрели ранее, поэтому сейчас займемся подробным рассмотрением двух других СВ.

Последовательность отказов, происходящих один за другим в какие-то моменты времени называют **потоком отказов.**

Потоки отказов могут быть **регулярными**  и **случайными.**

**Регулярный поток** – это поток отказов, следующих один за другим через строго определенные промежутки времени .

Такие потоки отказов сравнительно редко встречаются в реальных системах, но представляют интерес как предельный случай.

Типичным для сложных объектов является **случайный** поток отказов.

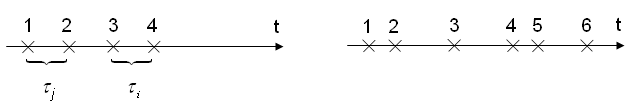


Рисунок 1 – Поток отказов

Наиболее часто приходится изучать случайные потоки, которым присущи следующие свойства:

1. **Стационарность.** Это свойство означает, что вероятность появления некоторого числа отказов в интервале времени  зависит только от его длительности и не зависит от начала его отсчета.
2. **Отсутствие последействия.** Это означает, что для любых непересекающихся участков времени число отказов, попадающих на один из них, не зависит от числа отказов попадающих на другие.
3. **Ординарность.** Под этим понимается, что появление более одного отказа за малый промежуток времени практически невозможно.

При выполнении всех перечисленных свойств поток называют **простейшим** (или стационарным пуассоновским).

Название это объясняется тем, что отказы объектов обычно происходят редко, и число появлений отказов за время t распределено по известному из теории вероятностей закону Пуассона.

Если обозначить:

-  - среднее число отказов в единицу времени;

-  - среднее число отказов за время t, т.е. , то согласно закону Пуассона вероятность появления ровно k отказов определяется по формуле

 k=0, 1, 2, …(1)

Вероятность того, что за время t не произойдет ни одного отказа



Вероятность противоположного события называют интегральной функцией распределения наработки



Видно, что данные вероятности распределены по показательному закону.

В качестве **показателей безотказности восстанавливаемых объектов** рассматривают вероятностные характеристики потоков отказов:

**1. Вероятность наступления ровно k отказов за время t**

 k=0, 1, 2, … (2)

 интенсивность пуассоновского потока.

Этот показатель должен удовлетворять условию



и позволяет вычислять вероятности и более сложных событий.

Например, вероятность того, что за время t произойдет не менее r отказов

.

Частный случай: **Вероятность безотказной работы за время t (P(t)=q(0,t)).**

Вероятность наступления менее  отказов:



**2. Среднее число отказов за время t** (ведущая функция потока отказов) представляет собой математическое ожидание дискретной случайной величины (числа отказов) и определяется по формуле

. (3)

**Примечание:** в литературе часто для ведущей функции потока отказов используется обозначение .

При наблюдении во время эксплуатации (испытаний) за N объектами определяют число их отказов  в течение времени t, а затем находят оценку рассматриваемого показателя

. (4)

Когда поток отказов является пуассоновским, то по аналогии с (2) вероятность появления за время t ровно k отказов определяется

.

**Вероятность безотказной работы**  .

В частном случае, когда поток отказов является простейшим и, следовательно, наработка распределена по показательному закону, параметр потока отказов равен интенсивности отказов .

**3. Среднее число отказов в единицу времени (параметр потока отказов)**

|  |  |
| --- | --- |
| **Параметр потока отказов** | Отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки |

Этот показатель также характеризует восстанавливаемый объект и по статистическим данным определяется с помощью формулы:

http://www.prostoev.net/lections_gif/Image525.gif, (5)

где n(t1) и n(t2) - количество отказов объекта, зафиксированных соответственно, по истечении времени t1 и t2.

Определение для группы объектов.

*Параметром потока отказов* называется отношение количества отка­завших изделий в единицу времени к количеству испытываемых изделий при условии, что отказавшие изделия заменяются исправными, т.е. количество ис­пытываемых изделий сохраняется одинаковым на протяжении всего испыта­ния.

Если не учитывать времени, необходимого на восстановление изделий, то параметр потока отказов определяется формулой

 (6)

Зависимость между параметром потока отказов и ранее рассмотренными показателями надежности устанавливается интегральным уравнением Вольтерра второго рода

 (7)

Это уравнение позволяет по известному параметру потока отказов ω(*t*) определить частоту отказов , а значит, интенсивность *λ(t)* и другие показатели надежности *Т0*, *P(t)* *q(t).* Уравнение связывает показатели надежности восстанавливаемых изделий и невосстанавливаемых при мгновенном восстановлении (мгновенной замене отказываемых элементов в изделии).

Связь параметра потоков отказа с ведущей функцией потока отказов 

. (8)

Имеет размерность обратную размерности времени.

Характер изменения во времени показателя  изображен на рис.2.



t

0

ω

H(t)

H(t1, t2)

Рисунок 2 – Зависимость 

После периода приработки восстанавливаемого объекта . Напомним, что для простейшего потока отказов , где  интенсивность отказов.

Если задана функция параметра потока ω(t), то можно определить среднее число отказов H(t):

.

Геометрический смысл величины  показан на рис. 2. При  имеем H(t)=ωt.

**4. Среднее число отказов в интервале времени (t1, t2).**

При ω=const: H(t1,t2)=ωt2-ωt1=ω(t2-t1).

Геометрический смысл H(t1, t2) показан на рис. 2.

**5. Вероятность безотказной работы в интервале (t1, t2).**

Обозначим случайные события:

A1 – безотказная работа объекта за время t1;

A2 - безотказная работа объекта за время t2  (t1<t2);

B - безотказная работа объекта в интервале времени (t1,t2).

Очевидно A2=A1B.

Согласно теореме умножения вероятностей

p(A2)=p(A1)p(B) или

p(t2)= p(t1) p(t1,t2) т.е. вероятность безотказной работы в интервале времени (t1,t2)

p(t1,t2)=p(t2)/p(t1) при пуассоновском потоке отказов



6. **Средняя наработка на отказ**

|  |  |
| --- | --- |
| . **Средняя наработка на отказ** | Отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки |

Обозначается как .

Периоды исправной работы *t1, t2,…,tn* чередуются с периодами восстановления *tB1, tB2,…,tBn* после каждого отказа. Статистическая оценка наработки на отказ определяется формулой

 (9)

где *п*- число отказов изделия за время *t*; *ti*, - время исправной работы между (*i*-1) и *i*-м отказами.

Если имеются данные для нескольких однотипных изделий, то статисти­ческая величина наработки на отказ вычисляется по формуле

 (10)

где *No*- количество испытываемых изделий; *tij*- время исправной работы *j*-го изделия между (/ -1) иотказом;- число отказов за время tt -ro образца;

 - наработка *j* -го образца за время *t*;  - суммарная наработка изделия за время *t*; - общее число отказов при испытании *No* изделий за время *t.*

**Рассмотрим показатели восстанавливаемости (ремонтопригодности) объектов.**

Последовательность моментов времени окончания ремонтных работ образует **поток восстановлений**.

Этот поток случайный, потому что случайными являются поток отказов и время восстановления объекта (см. рис.3)

1 2 3 4 5

Случайный поток отказов t

1 2 3 4 5

Случайный поток восстановлений t t

Рисунок 3 – Потоки отказов и восстановлений

**Число восстановлений объекта за время t-дискретная** случайная величина, а время восстановления **TB- непрерывная CB.**

В качестве показателей надежности зачастую рассматривают вероятностные характеристики этих CB. Параметры потока восстановления имеют те же вероятностные характеристики, что и параметры потока отказов.

1. **Параметр потока восстановления**

,

где NOB – число объектов, ожидающих восстановления;

nB(Δt) – число объектов, восстановленных за (t, t+Δt).

**Параметр потока восстановления** это среднее число восстановленных объектов в единицу времени.

По опытным данным для случайного времени TB восстановления объекта строят гистограмму, а затем определяют функцию плотности fB(t), которая может быть сглажена различными типовыми распределениями: показательным, Вейбулла-Гнеденко, нормальным и т.д.

На основе **функции плотности fB(t)** аналитическим методом можно вычислить различные показатели восстанавливаемости объектов.

1. **Вероятность восстановления** объекта за заданное время t

|  |  |
| --- | --- |
| **Вероятность восстановления** | Вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение |

Под вероятностью восстановления понимается вероятность того, что изделие будет восстановлено после отказа за данное время и в определенных ус­ловиях ремонта, т.е.

 (11)

где  - случайное время восстановления изделия,  - заданное время восста­новления

По своему математическому смыслу  представляет собой функцию распределения (интегральный закон распределения) времени восстановления

 (12)

где  - плотность распределения времени восстановления. Если , то

, (13)

где μ - интенсивность восстановления.

1. **Интенсивность восстановления** объекта в момент времени t

|  |  |
| --- | --- |
| **Интенсивность восстановления** | Условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено |



Этот показатель имеет размерность, обратную размерности времени восстановления объекта.

1. **Среднее время восстановления объекта**

|  |  |
| --- | --- |
| **Среднее время восстановления** | Математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа |

Среднее время восстановления характеризует среднее время вынужден­ного не регламентируемого простоя, вызванного отысканием и устранением одного отказа. Оно выражается математическим ожиданием



Имеет размерность случайной величины.

**Вопрос №2 Комплексные показатели надежности**

**Коэффициент готовности**

Процесс функционирования восстанавливаемого объекта можно представить как последовательность чередующихся интервалов работоспособности и восстановления (простоя).

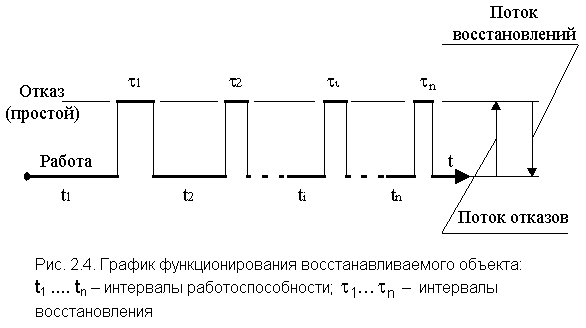


Рисунок 4 – Циклограмма функционирования восстанавливаемого объекта

***Коэффициент готовности*** - это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Математическое определение этого показателя будет дано при анализе надежности восстанавливаемых систем.

Этот показатель одновременно оценивает свойства безотказности и ремонтопригодности объекта.

Для одного ремонтируемого объекта коэффициент готовности

, (14)

где - время наработки объекта до го отказа, время восстановления объекта после го отказа.

В общем виде коэффициент готовности имеет вид

. (15)

Из выражения (15) видно, что коэффициент готовности объекта может быть повышен за счет увеличения наработки на отказ и уменьшения среднего времени восстановления. Для определения коэффициента готовности необходим достаточно длительный календарный срок функционирования объекта.

Зависимость коэффициента готовности от времени восстановления затрудняет оценку надежности объекта, так как по КГ нельзя судить о времени непрерывной работы до отказа. К примеру, для одного и того же численного значения КГ можно иметь как малые интервалы и ti так и значительно большие. Таким образом, можно доказать, что на конкретном интервале работоспособности вероятность безотказной работы будет больше там, где больше ti, хотя за этим интервалом может последовать длительный интервал простоя. Коэффициент готовности является удобной характеристикой для объектов, которые предназначены для длительного функционирования, а решают поставленную задачу в течение короткого промежутка времени (находятся в ждущем режиме).

**Коэффициент простоя** - вероятность нахождения объекта в состоянии отказа в произвольный момент времени, кроме периодов планового обслуживания.

. (16)

**Коэффициент оперативной готовности**

***Коэффициент оперативной готовности*** КОГ определяется как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается) и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Из вероятностного определения следует, что

, (17)

где КГ - коэффициент готовности; Р(tр) - вероятность безотказной работы объекта в течение времени (tр), необходимого для безотказного использования по назначению.

Для часто используемого в расчетной практике простейшего потока отказов, когда , вероятность безотказной работы объекта соответственно определяется на основе выражения

.

**Коэффициент технического использования**

***Коэффициент технического использования*** КТИ равен отношению математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период эксплуатации



Для одного объекта применима следующая формула

, (18)

где - время сохранения работоспособности в i-м цикле функционирования объекта;  время восстановления (ремонта) после i-го отказа объекта; - 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 (18), коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей (календарной) продолжительности эксплуатации. Следовательно, КТИ отличается от КГ тем, что при его определении учитывается все время вынужденных простоев, тогда как при определении КГ время простоя, связанное с проведением профилактических работ, не учитывается.

Суммарное время вынужденного простоя объекта обычно включает время:

- на поиск и устранение отказа;

- на регулировку и настройку объекта после устранения отказа;

- для простоя из-за отсутствия запасных элементов;

- для профилактических работ.

**Вопрос №3 Расчет надежности восстанавливаемых объектов с использованием теории Марковских процессов**

Приняв предложение о пуассоновском характере потока отказов и о показательном распределении времени восстановления, мы можем применить в теории надежности математический аппарат так называемых **марковских случайных процессов.** Сформулировано Марковым в 1906г. Марков Андрей Андреевич (1856-1922гг) Академик Российской АН (Петербург). Основные труды по теории вероятности, теории чисел и математическому анализу. Сын- Марков Андрей Андреевич (1903-1979гг) член АН СССР, математик.

Процесс, протекающий в физической системе, называется **марковским (или процессом без последствия)**, если для каждого момента времени вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от состояния системы в настоящий момент t0 и не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние.

Рассмотрим пример марковского процесса.

Предположим, что средство измерения, надежность которого мы исследуем в любой момент времени t, может находиться только в двух состояниях: x0 – работоспособном, x1 – неработоспособном (в ремонте). Обозначим вероятности этих состояний соответственно p0(t) и p1(t).

Из данного условия следует: .

Время безотказной работы и время восстановления (ремонта) - случайные величины, распределенные по экспоненциальным законам с интенсивностью отказов λ и интенсивностью восстановления μ.

В теории вероятностей доказано, что экспоненциальный закон является единственным, который обладает свойством называемым "отсутствием последствия".

(Промежуток времени, распределенный по этому закону, никак не влияет на закон распределения оставшейся части). Поэтому момент отказа (восстановления) работоспособности прибора не зависит от того, сколько времени он работал (ремонтировался).

Найдем вероятность работоспособного состояния p0(t) в любой момент времени p0(t+Δt).

Событие, заключающееся в том, что рассматриваемое нами средство измерения в момент времени t+Δt будет находиться в состоянии x0, может произойти двумя способами (см.рис.4):

x0

x1

Рисунок 5 – Граф состояний восстанавливаемого объекта

A – в момент времени t средство измерения находилось в состоянии x0 (работоспособно), а за время Δt не перешла из него в состояние x1 (неработоспособно);

B - в момент t система находилась в состоянии x1, а за время Δt завершился ремонт и система перешла в состояние x0.

По теореме сложения вероятностей имеем:

p0(t+Δt)=p(A)+p(B)

Найдем вероятность события A по теореме умножения.

Итак:

* вероятность того, что в момент t СИ была в состоянии x0 равна p0(t);
* вероятность того, что за время ∆t СИ осталась в работоспособном состоянии равна



Тогда вероятность события  равна:

p(A)≈p0(t)(1-λΔt).

Найдем p(B). Вероятность того, что система была в состоянии x1, равна p1(t).

Вероятность того, что за время Δt система вернется в состояние x0, т.е. будет восстановлена, равна

.

Тогда вероятность события  равна

.

В итоге имеем:

p0(t+∆t)≈ p0(t) (1-λ∆t)+p1(t)μΔt.

Преобразуем это выражение, разделив почленно на Δt, и сделав замену 

.

Переходя к пределу при Δt→0 получаем линейное дифференциальное уравнение первого порядка

.

Решение данного уравнения имеет вид:

 (7)

Изобразим решение на графике (рисунок 6).

p0 (t) не восст.

0



1

p0(t)

p0 (t) с восст.

t

Рисунок 6 – Изменение вероятности безотказной работы во времени

Если РЭО не восстанавливаемо, то μ=0. Получим p0(t)=exp(-λt). Нанесем и ее на график. Наглядно видно, что вероятность нахождения объекта в работоспособном состоянии в случае его восстановления выше, чем для неремонтируемых СИ.

Выражение (7) называют *функцией готовности объекта.* При  функция готовности преобразуется в коэффициент готовности

.

При составлении систем дифференциальных уравнений, описывающих более сложные графы состояния объектов надежности, в том числе и резервированных, удобно использовать «инженерное» правило Колмогорова: *назовём потоком вероятности  переход из состояния  в состояние , тогда производная вероятности каждого состояния равна сумме потоков идущих из других состояний в данное, минус все потоки, идущие из данного состояния в другие.*

**Лекция №4**

|  |  |
| --- | --- |
| **Тема:** | **Повышение надежности объектов с помощью резервирования** |
| Учебные вопросы: | 1. Понятие резервирования, термины, определения и классификация резервирования. 2. Классификация структурного резервирования. 3. Свойства последовательного и параллельного ( в смысле надёжности ) соединения элементов изделия. |

**Вопрос №1.** Понятие резервирования, термины, определения и классификация резервирования.

**(Выписка из ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения)**

|  |  |
| --- | --- |
| **РЕЗЕРВИРОВАНИЕ** | |
| **Резервирование** | Способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функции |
| **Резерв** | Совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования |
| **Основной элемент** | Элемент объекта, необходимый для выполнения требуемых функций без использования резерва |
| **Резервируемый элемент** | Основной элемент, на случай отказа которого в объекте предусмотрены одни или несколько резервных элементов |
| **Резервный элемент** | Элемент, предназначенный для выполнения функции основного элемента в случае отказа последнего |
| **Кратность резерва** | Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими элементов, выраженное не сокращенной дробью |
| **Дублирование** | Резервирование с кратностью резерва один к одному |
| **Нагруженный резерв** | Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента |
| **Облегченный резерв** | Резерв, который содержит один пли несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент |
| **Ненагруженный резерв** | Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функции основного элемента |
| **Общее резервирование** | Резервирование, при котором резервируется объект в целом |
| **Раздельное резервирование** | Резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы |
| **Постоянное резервирование** | Резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений |
| **Резервирование замещением** | Резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента |
| **Скользящее резервирование** | Резервирование замещением, при котором группа основных элементов резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый аз которых может заменить любой из отказавших элементов данной группы |
| **Смешанное резервирование** | Сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте |
| **Резервирование с восстановлением** | Резервирование, при котором восстановление отказавших основных и (или) резервных элементов технически возможно без нарушения работоспособности объекта в целом и предусмотрено эксплуатационной документацией |
| **Резервирование без восстановления** | Резервирование, при котором восстановление отказавших основных и (или) резервных элементов технически невозможно без нарушения работоспособности объекта в целом и (или) не предусмотрено эксплуатационной документацией |
| **Вероятность успешного перехода на резерв** | Вероятность того, что переход на резерв произойдет без отказа объекта, т. е. произойдет за время, не превышающее допустимого значения перерыва в функционировании и (или) без снижения качества функционирования |

Среди методов повышения надежности, предусмотренных при проектировании, особое место занимает использование избыточности, т.е. введение дополнительных средств и возможностей, минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. Сам метод повышения надежности объектов путем введения избыточности принято называть резервированием.

**Резервированием** называется применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов. Таким образом, резервирование разделяется на два направления: по техническим средствам и по дополнительным возможностям разного вида.

**Резерв** – совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для повышения надежности объектов. Резервом могут быть дополнительные элементы, вводимые в **структуру** объекта, а также дополнительные возможности в виде запаса **времени** на выполнение изделием определённой задачи, избытка **информации** при выполнении этой задачи, дополнительных **функциональных** возможностей для этого, запаса в **нагрузочной** способности изделия при выполнении им своей задачи.

Резервирование служит для того, чтобы объект, несмотря на внутренние или внешние изменения и отказы элементов, смог выполнить поставленную перед ним задачу, т.е. быть работоспособным.

Различают следующие **виды резервирования**:

1. Наиболее часто встречающееся на практике **структурное** – резервирование с применением дополнительных, резервных изделий или их элементов в случае отказа изделия или его элементов; т.е. появляются избыточные элементы в структуре изделия или избыточные изделия. При этом **основной** элемент (изделие) это элемент структуры, необходимый для выполнения изделием своих функций. Он становится **резервируемым,** если в случае отказа для него предусмотрен резервный элемент. **Резервный** элемент выполняет функции основного в случае отказа основного элемента.

Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых основных элементов объекта называется **кратностью резервирования**. Различают однократное резервирование, кратность которого равна единице (дублирование), и многократное, кратность которого больше единицы. Например, кратность k=5\2 означает, что имеется пять элементов резервных и два основных элемента; при дублировании k=1\1; при троировании k=2\1.

2.**Временное** – резервирование с применением резервов времени в случае отказа элементов объекта. При таком резервировании предусмотрено применение дополнительных возможностей в виде резерва времени, который может создаваться за счет повышения производительности работы объекта с целью компенсации простоев, вызванных устранением отказов элементов.

Временное резервирование это ускорение работы изделия с целью выполнения поставленной задачи, применяемое в случае возникновения отказа элемента, что ведёт к простою изделия во времени, а затем к более ускоренной производительной работе.

3.**Информационное** – резервирование с применением резервов информации. Такое резервирование применяется в объектах, которые осуществляют прием и обработку информации от нескольких датчиков, вырабатывая результирующее решение по суммарной получаемой информации. При этом с каждым датчиком информации работает некоторый канал, который может перейти в состояние отказа. Следовательно, при информационном резервировании необходимо иметь некоторое избыточное число датчиков информации и каналов их обработки. Ясно, что информация от датчиков должна быть различной по некоторым свойствам, как и структура каналов обработки. Иначе - в случае идентичности датчиков информации и каналов их обработки – образуется обычное структурное резервирование.

Примером информационного резервирования может служить наличие трёх бортовых радиодатчиков углового положения ВС относительно некоторого известного направления (бортовой АРК, бортовая система навигации VOR/DME, бортовая РСБН), которые обеспечивают информационный резерв у системы, определяющей местонахождение ВС.

4.**Функциональное** – резервирование с применением функциональных резервов. Такое резервирование возможно, если объект или его элементы являются многофункциональными, т.е. способными выполнять несколько различных функций или одновременно, или последовательно во времени в зависимости от полученных команд. При этом возникает возможность при отказе многофункционального элемента перевести его на выполнение других функций, либо передать его функции другому многофункциональному элементу. Этот вид резервирования имеет место, если многофункциональный объект может выполнять некоторую задачу при различных способах функционирования. Например, система передачи информации различными способами в зависимости от того, какие элементы объекта остались работоспособными.

5.**Нагрузочное** – резервирование с применением резерва по нагрузке. Подавляющее большинство элементов проектируется и изготавливается так, чтобы они имели резерв в способности выдерживать дополнительные нагрузки по отношению к номинальным. Реализацией нагрузочного резервирования является правильный выбор режимов работы элементов. Считается, что оптимальные электрические нагрузки элементов не должны превышать 25% от номинальных, а в менее ответственных случаях – 40%. В ряде случаев нагрузочное резервирование обеспечивается тем, что в объект вводят дополнительные элементы защиты от перегрузок.

Следует отметить, что в объекте может быть использовано несколько видов резервирования одновременно (структурное и нагрузочное, структурное и временное, функциональное и нагрузочное, и т.д.).

**Вопрос №2** **Классификация структурного резервирования**

Структурное резервирование может классифицироваться по ряду признаков( рисунок 1):

**1.Общее резервирование**, предусматривающее резервирование объекта в целом. В данном случае резервирующим элементом является аналогичный объект. Например, вместо одной бортовой радиостанции в работу (после её отказа) включается другая, аналогичная первой радиостанции.

**2.Раздельное резервирование**, которое предусматривает резервирование отдельных элементов объекта. В этом случае резервирующим элементом является аналогичный элемент или объект. Если в бортовой радиостанции резервируется приемник, передатчик, блок питания и т.д., тогда в случае отказа одного элемента включается резервный, а остальные продолжают работать до своего отказа и замены .

Следующим признаком структурного резервирования могут быть факторы, которые учитывают перестройку структуры объекта с возникновением отказа:

**1.Постоянное резервирование** обеспечивает работу основного элемента без перестройки его структуры при возникновении отказа. В случае постоянного резервирования основной и резервный элементы включены в постоянную работу и оба работают с одинаковой нагрузкой, т.е. наравне. Например, работа двух передатчиков на одну антенну одновременно и в одинаковых режимах.

**2.Динамическое резервирование**, основой которого является перестройка структуры объекта при возникновении отказа. В случае отказа какого-либо элемента или изделия в целом, следует либо отключение их от работы и включение в работу резервных, либо более сложное изменение структуры объекта, которое компенсирует отказ его элемента.

Наиболее часто динамическое резервирование сводится к резервированию **замещением**, которое предусматривает замену отказавшего элемента или объекта резервными аналогами. Резервирование замещением является **скользящим**, если имеются группы основных и резервных элементов, и любой из элементов резервной группы может заменить любой из элементов в группе основных в случае их отказа.

По виду нагрузки структурное резервирование делится на:

1.**Нагруженное** - резервные элементы, ожидая включения в работу, находятся в том же режиме нагрузки, что и работающий основной элемент. В случае общего резервирования, резервное изделие, ожидая включения, находится в режиме основного изделия. Отметим, что постоянное резервирование является нагруженным.

2.**Ненагруженное** - определяется состоянием, когда резервные элементы или объекты находятся в режиме ожидания в ненагруженном режиме.

3.**Облегченное** – состояние, при котором резервные объекты или элементы находятся в режиме ожидания в облегченном по нагрузке режиме.

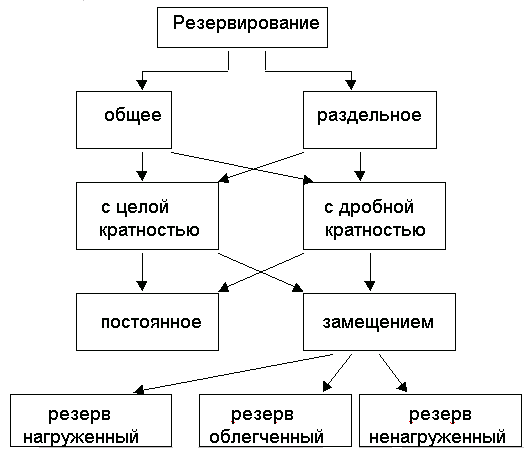


Рис. 1 – Классификация резервирования

По признаку восстановления структурное резервирование делится на:

1.**Восстанавливаемое** – при отказе элементов или объектов проводится их восстановление в процессе эксплуатации, т.е. применении по назначению.

2.**Невосстанавливаемое** - при отказе элементов или изделий их восстановление в процессе эксплуатации не происходит.

Таким образом, для характеристики используемого резервирования необходимо раскрыть его признаки, т.е. определить, какое оно:

а) общее или раздельное;

б) постоянное или динамическое (замещением или скользящее);

в) нагруженное или ненагруженное (облегченное);

г) восстанавливаемое или невосстанавливаемое.

Резервирование бортового РЭО является:

1. Общим – резервируется, как правило, изделие в целом – радиостанция, радиокомпас и т.д.
2. Замещением – только после отказа основного изделия включается резервное.
3. Ненагруженное – резервные изделия ожидают включения в работу в ненагруженном режиме.
4. Невосстанавливаемое – при отказе изделия на борту во время полёта восстановление не производится.

Резервирование наземного РЭО АП является:

1.Раздельным – изделие делится на элементы (шкафы, стойки, блоки) и резервируется поэлементно; после отказа некоторого блока в работу включается резервный блок.

2.Замещением.

3.Ненагруженным.

4.Восстанавливаемым – после отказа элемента и его замены на резервный начинается восстановление отказавшего элемента.

**Вопрос №3. Показатели надежности постоянного резервирования без**

**восстановления**

При постоянном резервировании основной и резервный элементы (изделия) работают наравне и с одинаковой нагрузкой, при отказе элементов (изделий) перестройка структуры не происходит и постоянное резервирование является нагруженным.

**Свойства последовательного и параллельного ( в смысле надёжности ) соединения элементов изделия**

С точки зрения надежности соединение элементов в структурной схеме надежности (ССН) может быть **последовательным** или **параллельным**. Соединение элементов с точки зрения надежности называют **последовательным**, если отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Соединение элементов в теории надежности называют **параллельным**, если отказ системы происходит только при отказе всех элементов.

Следует заметить, что не всегда последовательное и параллельное соединения элементов в ССН совпадают с последовательным и параллельным соединением элементов в функциональных и принципиальных схемах. Так, для увеличения емкости применяется параллельное соединение конденсаторов. Однако, если рассматривать в качестве отказов только пробой обкладок конденсаторов, то такое соединение в ССН должно быть последовательным, так как пробой любого конденсатора выводит из строя всю группу.

Рассмотрим порядок расчета показателей надежности системы при последовательном и параллельном соединении элементов с точки зрения надежности.

**Последовательное соединение элементов**

Напомним, что элементы объекта соединяются **последовательно** в смысле надежности, если отказ любого элемента изделия приводит к отказу всего изделия.

Схема последовательного соединения представлена на рис.2.



Рис. 2

При таком соединении элементов вероятность безотказной работы системы равна произведению вероятностей безотказной работы элементов:

 (1)

Вероятность отказа системы

 (2)

Интенсивность отказов системы равна сумма интенсивностей отказов элементов

 (3)

а средняя наработка до отказа системы равна

 (4)

Если все элементы системы равнонадёжны и отказы образуют простейший поток отказов, т.е. , то



 (5)

где  - средняя наработка до отказа одного элемента.

Таким образом, при последовательном соединении n равнонадёжных элементов и простейшем потоке отказов средняя наработка до отказа системы в n раз меньше средней наработки до отказа одного элемента, а интенсивность отказов системы соответственно в n раз больше.

**Параллельное соединение элементов**

Напомним, что если элементы в смысле надежности соединяются **параллельно**, то отказ системы наступает только после отказа всех элементов. Система при параллельном соединении элементов представлена на рис.3.

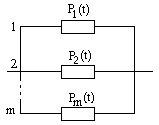


Рис.3.

При таком соединении вероятность отказа системы равна произведению вероятностей отказа элементов:

 (6)

а вероятность безотказной работы системы определяется как

 (7)

Если элементы однотипны, то есть Р1(t) = Р2(t) = … = Рj (t) = P(t); и λ1(t) = λ2(t)= …= λj (t) = λ(t), то:

. (8)

Интенсивность отказов системы равна:

. (9)

Средняя наработка до отказа системы для простейшего потока отказов и случая λ1 = λ2= …= λm  = λ равна

 (10)

Например, если m=2 ( в схеме на Рис.3.2 кратность резервирования k=1\1, т.е. в работе участвует один основной элемент и один резервный), то  где Т0 –средняя наработка до отказа одного элемента.

**Лекция №5**

|  |  |
| --- | --- |
| **Тема:** | **Надежность резервированных систем** |
| Учебные вопросы: | 1.Показатели надежности постоянного резервирования без восстановления.  1.1 Надежность схем с общим постоянным резервированием без восстановления.  1.2 Надежность схем с раздельным постоянным резервированием без восстановления.  2. Показатели надёжности общего и раздельного ненагруженного резервирования замещением без восстановления.  3. Частные случаи резервирования |

**Вопрос №1. Показатели надежности постоянного резервирования без восстановления.**

* **1.1 Надежность схем с общим постоянным резервированием без восстановления**

Пусть имеется некоторая (основная) система, которую можно представить в виде последовательно соединенных n равнонадежных элементов. Тогда вероятность безотказной работы и вероятность отказа основной системы

 (1)

* Для повышения безотказности этой системы одновременно с ней

выполняют те же функции m других точно таких же систем (рис.1).

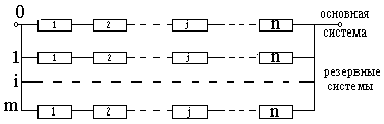


Рис.1

Система, состоящая из идентичных основной и m резервных систем, перестаёт выполнять свои функции тогда, когда откажут и основная, и все резервные системы. С учётом (1) и того, что в работе находится всего (m+1) систем, вероятность отказа резервированной системы

 (2)

Вероятность безотказной работы резервированной системы

 (3)

Если все элементы систем одинаковы по надёжности, т.е. p1(t)=p2(t)=..

=pn(t)=p(t), то . (4)

В формулах (3) и (4) учтено последовательное соединение элементов в системах (по строкам) и параллельное соединение систем ( по столбцам ).

Для простейшего потока отказов элементов системы, когда интенсивность отказов первого элемента  второго , интенсивность отказов λс для одной системы (т.е. по строке) равна сумме интенсивностей отказов элементов [см. формулу (3)]. Следовательно, для этой системы

 (5)

Подставив (5) в (3), получим

 (6)

Интенсивность отказов резервированной системы

 (7)

Среднее время наработки до отказа резервированной системы

 (8)

Из (8) следует, что в случае дублирования m=1 и  в случае троирования m=2 (одна основная и две резервных системы) и  где 

Вывод: Постоянное общее резервирование обладает недостаточной эффективностью – введение одной резервной системы (дублирование) даёт 50% выигрыш в средней наработке до отказа (при ожидаемом 100% выигрыше, т.е. удвоении этого показателя), а введение ещё одной резервной системы (троирование) добавляет примерно 33,3% выигрыша по сравнению с дублированием. Дальнейшее увеличение кратности резервирования даёт ещё меньший выигрыш в надёжности, поэтому на практике m>2 используется крайне редко.

**1.2 Надежность схем с раздельным постоянным резервированием без восстановления**

Резервированную систему с раздельным резервированием и постоянно подключенным резервом можно представить в виде (рис.2).

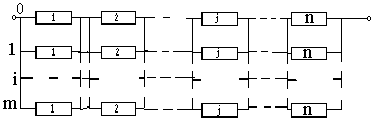


Рис.2

Резервированная система включает в себя n последовательно включённых узлов. Узлом назовем группу из m+1 однотипных параллельно соединенных элементов. Отказ любого i-го узла наступит только тогда, когда откажут все его m+1 элементов. Вероятность этого события

 (9)

где i=1,2,..n – номера столбцов и элементов в строке.

Вероятность безотказной работы i-го узла

 (10)

Резервированная система (см. Рис.2) состоит из основной системы (номер которой 0), имеющей n последовательно включённых элементов с вероятностями безотказной работы p1(t), p2(t),..pn(t) и m резервных систем. Вероятность безотказной работы резервированной системы определяется выражением :

 .

При равнонадежных элементах систем, т.е. при p1(t)= p2(t) =..= pn(t) = =p(t)  . (11)

Если поток отказов элементов систем простейший, то , и вероятность безотказной работы резервированной системы равна:

. (12)

Средняя наработка до отказа резервированной системы в случае равно- надежных элементов и простейшего потока отказов находится по формуле



Произведя замену



получим: 

Решением этого интеграла будет



где ТОС определяется формулой (10 );

 - число сочетаний из (n-1) по i;

 (13)

Если система состоит из n = 3 элементов и используется дублирование элементов m= 1, то

.

 (14)

С помощью формулы (13) получаем:

,

.

С помощью (14) окончательно получаем:

.

Полученное значение средней наработки до отказа сравним со значением средней наработки до отказа без резервирования и в случае общего резервирования.

Без резервирования для трех элементов , а отношение , т. е. раздельное резервирование в 2,8 раза эффективнее для данного случая по сравнению с нерезервированной системой

В случае общего резервирования

, а отношение , т.е. раздельное резервирование в 1,9 раза эффективнее по сравнению с общим.

Сравнив общее и раздельное резервирование в отношении вероятности возникновения отказов, получаем:



При малых значениях q имеем:

.



Таким образом, чем на большее число элементов разбивается система для раздельного резервирования, тем больше получается выигрыш в отношении вероятности отказов системы с раздельным резервированием по отношению к системе с общим резервированием.

В заключение проведём сравнение раздельного и общего резервирования по значениям вероятности безотказной работы. Примем, что используется дублирование систем (m=1), все элементы систем равнонадёжны, и в состав систем входят n=5 элементов.

Если принять для элементов систем p(t) = 0,8, то по формулам (13) и (11) получается:  а их отношение равно 1,5, т.е. раздельное резервирование эффективнее общего в 1,5 раза. При p(t) = 0,2 это отношение становится равным 9,43.

Следовательно, раздельное резервирование более эффективно, чем общее, особенно в случае малонадёжных элементов или при наработках, когда элементы становятся малонадёжными.

**Вопрос №2. Показатели надежности общего и раздельного ненагруженного замещением резервирования без восстановления**

Резервирование замещением является частным случаем динамического резервирования, при котором в случае отказа элемента в системе происходит перестройка структуры системы. При возникновении отказа основного элемента его функции передаются резервному элементу. Для этого имеются специальные переключающие устройства, которые отключают отказавшие элементы, а вместо них включают в работу резервные элементы.

**При общем резервировании** вместо отказавшей системы в работу включается резервная система в целом, которая находится в режиме ожидания включения в работу и является ненагруженной. После отказа основной системы или одной из резервных они не подвергаются восстановлению. Такое резервирование используется на борту самолетов и вертолетов. Например, после отказа основной радиотехнической системы посадки и навигации в работу включается одна из двух резервных систем (кратность резервирования к=2/1). Отказавшие системы во время полета не восстанавливаются.

Структурная схема надежности общего резервирования замещением показана на рис.3 Она включает основную систему и m резервных систем, кратность резервирования равна k = m/1. Считаем, что переключающие устройства являются абсолютно надежными и включают в работу резервные системы.

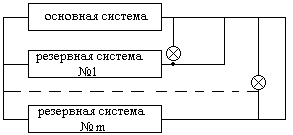


Рис.3

Для случая дублирования кратность резервирования k = 1/1, а вероятность безотказной работы определяется следующим выражением:

 (14)

где λ0 = cost- интенсивность отказов системы.

Интенсивности отказов основной системы и резервных одинаковы. Из формулы видно, что выигрыш в надежности по сравнению с отсутствием резервирования равен (1+λ0t) и выигрыш увеличивается с ростом времени (наработки). Этот выигрыш означает, что с ростом времени все меньшее число резервированных систем откажет по сравнению с числом отказавших нерезервированных систем. Напомним, что функция  показывает, какая доля объекта надёжности (множества резервированных систем) в момент t останется в работоспособном состоянии. Средняя наработка до отказа определяется следующим образом:

 (15)

т.е. средняя наработка до отказа дублированной системы в два раза больше, чем средняя наработка до отказа основной системы. В том случае, когда имеется не одна, а m резервных систем, т.е. k = m/1

 (16)

или

 (17)

Среднее время наработки до отказа

 (18)

Средняя наработка состоит из суммы средней наработки до отказа основной системы и средних наработок до отказа всех резервных систем.

В смысле средних наработок до отказа получается некоторая система со свойством «эстафеты», т.е. основная система как объект надежности в среднем работает Т0, после отказа ее замещает первая резервная система, которая в среднем работает такое же время Т0, после отказа первой резервной системы включается вторая резервная система и т.д.

**При раздельном ненагруженном замещением резервировании** основная система состоит из n элементов, каждый из них резервируется замещением с кратностью m. Структурная схема надежности для такого резервирования представляет собой последовательное соединение n устройств, каждое из которых содержит m резервных элементов.

Рассмотрим основные показатели надежности раздельного ненагруженного замещением резервирования при следующих условиях:

* кратность резервирования k = 1/1 (дублирование);
* все элементы основной и резервной системы равнонадежны и имеют одинаковую интенсивность отказов λ0 = const.

Структурная схема по надежности имеет следующий вид:

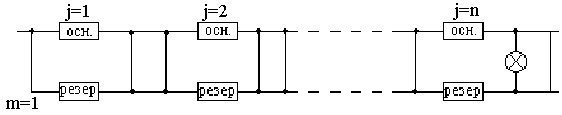


Рис.4

Вероятность безотказной работы всей резервированной системы определяется по формуле

 (19)

Выигрыш по вероятности безотказной работы резервированной раздельным способом системы по сравнению с не резервированной системой равен:

 (20)

Значение средней наработки до отказа резервированной системы определиться по формуле

 (21)

Формулу (21) можно переписать в виде



где  -полная гамма-функция аргумента(n+1).

Учитывая, что средняя наработка до отказа не резервированной системы равна  , выигрыш резервирования равен:

.

Учитывая формулу Стирлинга:  и то, что значение , выигрыш по средней наработке .

Для системы из n=5 элементов он равен S2,=2,8, а для системы из n=10 элементов S2 = 3,95.

Полученные результаты показывают, что раздельное замещением ненагруженное резервирование более эффективно, чем общее замещением, и этот эффект тем сильнее, чем больше элементов имеется в составе системы.

Однако раздельное резервирование требует больших затрат: постановку n переключающих устройств, усложнение структуры системы, материальные затраты и т.д. Однако, эти затраты вполне окупаются, если резервирование используется в технике, от которой требуется высокая надежность. Следует отметить, что для осуществления оптимизации резервирования с учетом ограничений по стоимости, весу или габаритам следует рассматривать два аспекта этой задачи:

1. Обеспечение заданной надежности при минимальных затратах на резервирование.
2. Обеспечение максимальной надежности при известных допустимых затратах на резервирование.

**Вопрос №3 Частные случаи резервирования**

**3.1** **Резервирование с** **дробной кратностью.**

Рассмотрим случай, когда система состоит из  основных элементов и  резервных элементов. Причем . Такой случай называется **резервированием с дробной кратностью (рис 5).**

****

Рисунок 5 – Структурная схема надежности при резервировании замещением с дробной кратностью

Основные показатели надежности для случая нагруженного резервирования замещением с дробной кратностью определяются следующим образом:

* вероятность безотказной работы

, (21)

где  - вероятность безотказной работы элемента системы. Полагается, что все элементы системы равнонадежны;

* наработка до отказа

, (22)

где  интенсивность отказа элемента системы.

**3.2 Мажоритарное резервирование**

**Мажоритарное резервирование** является разновидностью нагруженного резервирования с дробной кратностью изделия, основанного на его функциональной и конструктивной избыточности. Под функциональной избыточностью в данном случае понимают введение с помощью мажоритарного элемента (МЭ) дополнительной операции, т.е. принятия окончательного решения по принципу большинства. Другими словами, при совпадении значений выходных параметров  устройств, если допустим одновременный отказ  устройств, а ** и ** связаны между собой формулой *,* изделие в целом считают исправным.

Таким образом, МЭ реализует закон большинства, или мажоритарный закон. Свое обоснование этот закон впервые получил в теории отказоустойчивого кодирования. Результатом его применения стало существенное повышение достоверности передачи сообщений по каналу связи. На практике наибольшее распространение получил МЭ, для которого , а ** (два из трех). Конструктивной же избыточностью обладает любое резервированное изделие.

Оценим надежность изделия с мажоритарным резервированием на основе МЭ «два из трех», показанного на рисунке 6.

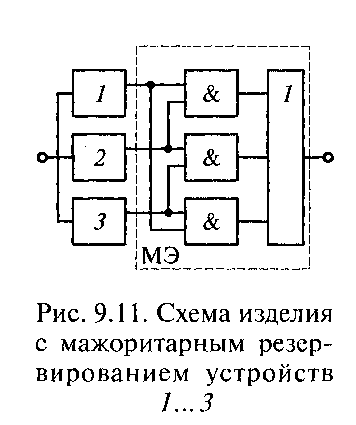


Рисунок 6 – Схема изделия с мажоритарным резервированием «два из трёх»

Для расчета вероятности безотказной работы изделия с мажоритарным резервированием ** запишем возможные исходы его функционирования на момент времени *t,* образующие полную группу событий:

* исправно работают все устройства;
* исправно работают устройства 1и 2, отказало устройство 3*;*
* исправно работают устройства 1и 3, отказало устройство 2*;*
* исправно работают устройства 2 и 3*,* отказало устройство 1.

Тогда при допущении, что отказ МЭ маловероятен, а вероятности безотказной работы устройств равны между собой и равны, запишем:

.

Например, при ** вероятность безотказной работы изделия с мажоритарным резервированием . При отсутствии резервирования, когда одновременно должны быть работоспособны 2 элемента, имеем .

**Лекция №6**

|  |  |
| --- | --- |
| **Тема:** | Анализ показателей надежности по экспериментальным данным |
| **Учебные вопросы:** | 1.Планирование испытаний и обработка экспериментальных данных 2.Интервальная оценка показателей надежности |
|  |  |

**Вопрос №1**

В предыдущих разделах производилась оценка надежности объектов (систем), исходя из того, что исходные показатели надежности элементов, составляющих систему, известны. Между тем, как уже отмечалось, надежность закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается в эксплуатации. На каждом из этапов жизненного цикла объекта необходимо оценивать его фактическую надежность, для этого требуются экспериментальные данные. В эксплуатации персонал располагает паспортными исходными показателями надежности элементов, составляющих объект (систему). Для того, чтобы оценить фактические долговечность, безотказность, ремонтопригодность и сравнить их с параметрами завода-изготовителя необходимы данные, полученные в условиях эксплуатации. Важным источником информации о надежности является система сбора данных о работе объектов в процессе эксплуатации.

Для обеспечения единства исходных данных о надежности первичная информация об отказе, в соответствии с существующей нормативно-технической документацией, должна содержать определенные информационные признаки: дату возникновения отказа или неисправности; общую наработку объекта с начала его эксплуатации до момента установления отказа (определения неисправности); внешние признаки и характер появления отказа или неисправности; условия эксплуатации и вид работы, при которых был обнаружен отказ или установлена неисправность; способ устранения неисправности; принятые или рекомендованные меры по предупреждению возникновения отказов или неисправностей. Сбор информации и заполнение первичной документации о надежности проводятся в обычных условиях обслуживающим персоналом, а при опытной и подконтрольной эксплуатации - либо дежурным персоналом, либо представителями службы (группы) надежности, организованной специально для сбора информации о надежности.

Основными видами документации при сборе первичной информации об отказах элементов системы являются журналы, формуляры, карточки. В ***журналах*** фиксируется информация о надежности всех элементов подконтрольной системы. ***Формуляры*** ведутся на каждый объект (устройство). Их преимущество заключается в том, что они содержат всю информацию о работе устройства с момента его установки (например, силового трансформатора). ***Карточки*** являются наиболее оперативной формой информации. Они заполняются при каждом отказе. Информация, отраженная в карточках, лучше всего подготовлена для ее автоматической обработки на ЭВМ.

Если сбор информации ведется специально выделенным для этой цепи обслуживающим персоналом или представителями службы (группы) надежности, контроль и запись данных об условиях работы, последствиях отказов производится представителями этой службы. Остальная документация ведется обслуживающим персоналом.

**Классификация испытаний**

Укрупненная классификация испытаний на надежность приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация испытаний на надежность

|  |  |
| --- | --- |
| Признак классификации | Виды испытаний |
| Цель испытаний | Определительные, контрольные, исследовательские (граничные, климатические и др.) |
| Испытываемое свойство надежности | Испытания на безотказность, долговечность (ресурсные), ремонтопригодность, сохраняемость, комплексные испытания |
| Этапы разработки изделия | Доводочные, предварительные, приемочные, типовые квалификационные. |
| Уровень проведения | Ведомственные, межведомственные, государственные |
| Степень интенсификации процесса | Нормальные, ускоренные (сокращенные и форсированные) |
| Влияние на возможность последующего использования | Разрушающие, неразрушающие |
| Вид объекта испытаний | Испытания изделия (натурные), макета, модели |
| Место проведения | Лабораторные (стендовые), полигонные, эксплуатационные |
| Метод получения результатов | Экспериментально-статистические, расчетно-экспериментальные |

*Определительные испытания* - испытания, проводимые для определения значений характеристик объекта с заданными значениями точности и (или) достоверности. Результаты определительных испытаний служат основанием для внесения показателей надежности в техническую документацию на изделия. Они могут использоваться также для выявления ненадежных элементов и схемно-конструктивных недоработок в изделии, для разработки рекомендаций по повышению надежности, установления групп по надежности, уточнения режима и параметров технического обслуживания, объема и состава ЗИП и т. п.-

*Контрольные испытания* - испытания, проводимые для контроля качества объекта. Среди контрольных обычно различают приемо-сдаточные и типовые испытания. Контрольные испытания готовой продукции, проводимые при приемочном контроле, называются приемо-сдаточными. К типовым испытаниям относятся контрольные испытания продукции, проводимые с целью оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию, рецептуру или технологический процесс.

*Исследовательские испытания* - испытания, проводимые для изучения определенных характеристик свойств объектов. Исследовательские испытания, проводимые для определения зависимости между предельно допустимыми значениями параметров объекта и значениями параметров режимов эксплуатации, называются граничными.

*Доводочные испытания* - исследовательские испытания, проводимые в процессе разработки изделий с целью оценки влияния вносимых в них изменений для достижения требуемых показателей качества.

*Предварительные испытания* - контрольные испытания опытных образцов (партий) изделий с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

*Приемочные испытания* - это контрольные испытания опытных образцов (партий) изделий, а также изделий единичного производства, проводимые соответственно для решения вопроса о целесообразности постановки на производство этих изделий или передачи их в эксплуатацию.

К *нормальным* относятся испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации.

*Ускоренные испытания* - испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях.

*Сокращенные испытания* - испытания, проводимые по сокращенной программе без интенсификации процессов, вызывающих отказы и повреждения.

*Форсированные испытания* - ускоренные испытания, основанные на интенсификации деградационных процессов, приводящих к отказам.

*Разрушающие испытания* - испытания с применением разрушающих методов контроля, которые могут нарушить пригодность объекта к использованию по назначению.

*Неразрушающие испытания* - испытания с применением неразрушающих методов контроля.

Испытаниям могут подвергаться как натурные опытные или серийные образцы изделий и систем, так и их макеты и модели.

*Натурные испытания* - испытания объекта в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению с непосредственным оцениванием или контролем определяемых характеристик свойств объекта.

*Макет для испытаний* - изделие, представляющее собой упрощенное воспроизведение объекта испытаний или его части и предназначенное для испытаний.

*Модель для испытаний* - изделие, процесс, явление, математическая модель, находящееся в определенном соответствии с объектом испытаний и (или) воздействиями на него, и способное замещать его в процессе испытаний.

К *лабораторным (стендовым)* относятся испытания, проводимые в лабораторных условиях на испытательном стенде, т.е. на техническом устройстве, предназначенном для установки объекта испытаний в заданных положениях, создания воздействий, съема информации и осуществления управления процессом испытаний и (или) объектом испытаний.

*Полигонные* испытания проводятся на испытательном полигоне, т.е. на месте, предназначенном для проведения испытания в условиях, близких к условиям эксплуатации объекта, и обеспеченном необходимыми средствами испытаний.

К *эксплуатационным* относятся испытания, проводимые для определения (оценки) показателей надежности в заданных режимах и условиях эксплуатации.

В соответствии с требованиями ГОСТ 27.002-83 планирование испытаний предусматривает ряд предварительных условий, обеспечивающих эффективность испытаний. Вводятся условные обозначения различных планов в виде совокупности трех символов, первый из которых указывает число испытываемых объектов (устройств) N, второй - наличие (R) или отсутствие (U) замены (восстановления) объектов, отказавших во время испытаний, третий - длительность испытаний (r или Т). Таким образом, для испытаний N объектов без замены отказавших, имеем следующие три плана:

(N, U, r) - испытания до r-го отказа;

(N, U, T) - испытания длительностью Т;

[N, U, (r, T)] - испытание длительностью, равной http://www.prostoev.net/lections_gif/Image842.gifили Т), где http://www.prostoev.net/lections_gif/Image843.gif- момент r-го отказа, а Т - заведомо заданное время, или км пробега, или число циклов и т.д.

Аналогично вводятся обозначения для планов с заменой (восстановлением) отказавших устройств:

(N, R, r); (N, R, T); [N, R, (r, T)]. В плане (N, R, r) в отличие от   
(N, U, r) число r может быть больше, чем N (где, в частности, допустимо N = 1). Здесь приведено 6 наиболее распространенных типов испытаний. ГОСТ 27.001-83 предусматривает 16 планов испытаний, где учтены кроме названных условий и такие как M - восстановление объектов при испытаниях в случае их отказов; S - решение об окончании испытаний (о приемке или браковке) восстанавливаемых объектов (основывается на суммарном времени испытаний).

Результаты статистической обработки испытаний существенно зависят от вероятностных моделей, то есть от априорных (теоретических) распределений интервалов безотказной работы и восстановлений. Эти результаты могут приводить к заведомо ошибочным выводам, если модель не отражает реальные процессы возникновения отказов и механизмы восстановления. Поэтому до решения основных задач апостериорного (на основе опыта) анализа надежности целесообразно сначала проверить, с помощью статистического критерия согласия, на соответствие выбранного априорного распределения эмпирическому распределению, построенному на основании данных проведенных испытаний.

Исходными данными (случайными величинами), которые подвергаются обработке, являются время наработки на отказ, время наработки на восстановление и число отказов однотипных элементов. После того, как такой материал собран, его обработка позволяет установить законы распределения показателей надежности: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднее время наработки на отказ и др.

Знание законов распределения дает возможность определить все остальные количественные показатели надежности. Таким образом, основная задача статистической обработки состоит в определении одного из законов распределения исходных случайных величин. В ряде случаев вид закона распределения известен заранее, до опыта. Например, как уже отмечалось выше, для электронной аппаратуры средств автоматики и релейной защиты справедлив экспоненциальный закон распределения показателей надежности. Это подтверждается многочисленными опытными данными, полученными в условиях эксплуатации.

При определении или подтверждении закона распределения целесообразен следующий порядок: подготовка опытных данных; построение гистограмм оцениваемого количественного показателя надежности; аппроксимация гистограмм теоретическим законом распределения и определение его параметров; проверка допустимости предполагаемого закона распределения на основе использования критериев согласия. Наиболее часто используется критерий http://www.prostoev.net/lections_gif/Image590.gifили критерий Колмогорова. Для получения достаточно точных результатов число наблюдений случайной величины (отказов) должно быть не менее 40-50.

По результатам полученных в процессе эксплуатации данных составляются таблицы, см. табл. 2.

Примечание: http://www.prostoev.net/lections_gif/Image844.gif- интервалы времени от начала эксперимента (t = 0) до соответствующего момента; http://www.prostoev.net/lections_gif/Image845.gif- число отказов, зафиксированных за соответствующее время, начиная с начала эксперимента; ti - отрезок времени, например http://www.prostoev.net/lections_gif/Image846.gif= t2 - t1; ti = http://www.prostoev.net/lections_gif/Image847.gif- ti (как правило t1 = t2 = ... =ti, то есть ti = const); http://www.prostoev.net/lections_gif/Image848.gif- число отказов, зафиксированных на заданном отрезке времени ti; Nо - число однотипных образцов, поставленных на испытания; http://www.prostoev.net/lections_gif/Image849.gif- среднее число образцов, работоспособных на соответствующем отрезке ti; http://www.prostoev.net/lections_gif/Image850.gifhttp://www.prostoev.net/lections_gif/Image851.gifhttp://www.prostoev.net/lections_gif/Image852.gif- соответственно оценки вероятности отказа, плотности распределения отказов и интенсивности отказов. По данным табл. 2 строятся гистограммы искомого показателя надежности, затем гистограммы аппроксимируются. По виду аппроксимации анализируемой кривой можно ориентировочно установить закон распределения времени отказов. Для экспоненциального закона наиболее показателен график . Если анализируемая зависимость окажется  (см. рис. 1), то это экспоненциальный закон.

Таблица 2 – Экспериментальные данные для построения гистограмм законов распределения

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | 1 | 2 | ... | i | ... | к |
| ti, ч |  |  |  |  |  |  |
| http://www.prostoev.net/lections_gif/Image853.gifшт |  |  |  |  |  |  |
| http://www.prostoev.net/lections_gif/Image854.gif |  |  |  |  |  |  |
| ti, ч |  |  |  |  |  |  |
| http://www.prostoev.net/lections_gif/Image848.gif, шт. |  |  |  |  |  |  |
| http://www.prostoev.net/lections_gif/Image855.gif, 1/ч |  |  |  |  |  |  |
| http://www.prostoev.net/lections_gif/Image856.gif, 1/ч |  |  |  |  |  |  |

Согласно критерию Колмогорова, экспериментальное распределение случайной величины согласуется с выбранным теоретическим распределением, если выполняется условие http://www.prostoev.net/lections_gif/Image857.gif, в котором D наибольшее отклонение теоретической кривой функции распределения времени до отказа от экспериментальной, а n - число отказов. Пример аппроксимации гистограммы http://www.prostoev.net/lections_gif/Image858.gif, полученной в результате обработки статистической кривой, представлен на рис. 1.

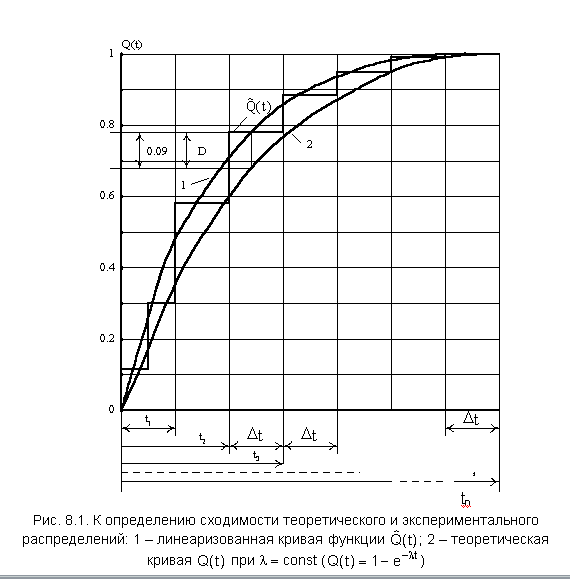
Для построения теоретической кривой 2 значение  определяется из графика http://www.prostoev.net/lections_gif/Image504.gif, построенного по экспериментальным данным (табл. 2). 

Рисунок 1

Наибольшее отклонение D определяется между кривыми 1 и 2. Количество зафиксированных отказов n за время наблюдений определяется по формуле http://www.prostoev.net/lections_gif/Image862.gif.

С целью избежания ошибок при построении графиков (рис. 1), их необходимо строить на специальной бумаге с мелкой миллиметровой сеткой в соответствующем масштабе. Величина параметра D определяется простой разностью значений кривых 1 и 2 в зоне их наибольшего расхождения. Если http://www.prostoev.net/lections_gif/Image863.gif, то можно считать, что значение , полученное из опытных данных, есть искомый параметр экспоненциального распределения.

Вероятность безотказной работы анализируемого типа элементов соответственно определяется формулой http://www.prostoev.net/lections_gif/Image536.gif, а средняя наработка до отказа - формулой http://www.prostoev.net/lections_gif/Image864.gif.

**Вопрос 2**

Количество статистических данных для оценки надежности, полученных в процессе эксплуатации, принципиально ограничено. Полученные по ограниченному объему информации точечные оценки могут оказаться весьма приближенными. Причем отклонения этих оценок от истинного значения оцениваемого параметра являются величинами случайными. Очевидно, что с увеличением числа наблюдений (отказов) случайная ошибка оценки показателей уменьшается. На основе опытных данных используется специальная методика оценки показателей надежности в определенном интервале возможных их значений. Предположим, что истинное значение средней наработки до отказа составляет Т0, а средняя наработка до отказа определена по полученным отказам:

http://www.prostoev.net/lections_gif/Image866.gif,

где n - количество отказов за время испытаний, ti - наработка до i-го отказа. Чем меньше n тем больше расхождение между Т0 и http://www.prostoev.net/lections_gif/Image867.gif, то есть существует интервал расхождения.

Найти точные границы, в пределах которых находится истинное значение искомой величины, не представляется возможным. Однако можно определить интервал ее возможных значений с некоторой доверительной вероятностью   . При этом, чем больше доверительная вероятность, тем шире границы интервала и наоборот.

В общем случае эта зависимость имеет вид

, (1)

где Тн и Тв – соответственно, нижняя и верхняя границы интервала средней наработки до отказа, где лежат http://www.prostoev.net/lections_gif/Image867.gifи Т0.

Вероятность того, что значение Т0 выйдет за заданный интервал называется уровнем значимости:

. (2)

Значения доверительных вероятностей  обычно принимают равными 0,9; 0,95; 0,99. Соответствующие им уровни значимости составят 0,1; 0,05; 0,01. Доверительная вероятность , определяемая выражением (1), характеризует степень достоверности результатов двусторонней (то есть с определением верхней и нижней границ) оценки.

Доверительный интервал для средней наработки до отказа при равных вероятностях  выхода за правую (верхнюю) и левую (нижнюю) границы для экспоненциального распределения определяется по выражению

, (3)

где   и   - значения http://www.prostoev.net/lections_gif/Image590.gif(хи-квадрат) при параметрах   и ; 2r=k - число степеней свободы, для вероятностей  и  соответственно.

Когда вычисляется только нижняя граница, то

. (4)

В выражениях (3) и (4) - суммарная наработка до отказа по отказам, зафиксированным во время эксперимента.

Значения    и   определяются по таблице квантилей распределения   (хи-квадрат).

Таким образом, для заданных уровней значимости  и числа степеней свободы k по таблице находят соответствующие значения  , подставляют в выражение (3) и находят Tн и Tв.

Величина  задается в зависимости от требований, предъявляемых к анализируемой системе.

Как известно, для экспоненциального закона  и   выражения для оценки верхнего и нижнего значений вероятности безотказной работы имеют вид

 , где , (5)

 , где . (6)

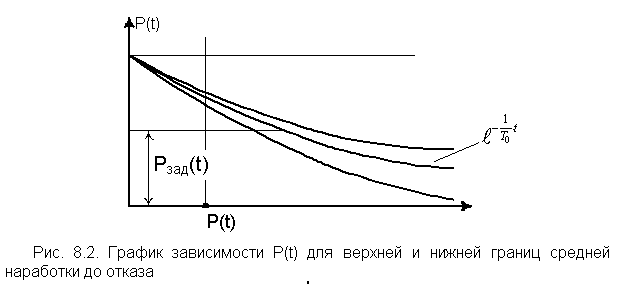


Рисунок 2

Из рис. 8.2 видно, что по практическим соображениям более важно определить Pн(t). Если значение Pн(t) удовлетворяет заданному уровню надежности Pзад(t) на интервале времени от 0 до t, то истинное значение:

.

Это говорит о запасе надежности анализируемого устройства на интервале времени от 0 до t.

Для определения Tн и Tв по выражениям (3) и (4) необходима суммарная наработка .

В табл. 3 приведены формулы вычислений суммарной наработки для наиболее распространенных планов проведения испытаний

Таблица 3 – Определение суммарной наработки для соответствующих планов испытаний

|  |  |
| --- | --- |
| План испытаний | Суммарная наработкаhttp://www.prostoev.net/lections_gif/Image887.gif, ч |
| (NUr) | http://www.prostoev.net/lections_gif/Image887.gif= http://www.prostoev.net/lections_gif/Image888.gif |
| (NUT) | http://www.prostoev.net/lections_gif/Image887.gif= http://www.prostoev.net/lections_gif/Image889.gif |
| NU(r, T) | при http://www.prostoev.net/lections_gif/Image890.gifhttp://www.prostoev.net/lections_gif/Image887.gif=http://www.prostoev.net/lections_gif/Image891.gif  при http://www.prostoev.net/lections_gif/Image892.gifhttp://www.prostoev.net/lections_gif/Image887.gif=http://www.prostoev.net/lections_gif/Image893.gif |
| (NRr) | http://www.prostoev.net/lections_gif/Image887.gif= http://www.prostoev.net/lections_gif/Image894.gif |
| (NRT) | http://www.prostoev.net/lections_gif/Image887.gif= NT |
| NR(r, T) | при http://www.prostoev.net/lections_gif/Image895.gifhttp://www.prostoev.net/lections_gif/Image887.gif= http://www.prostoev.net/lections_gif/Image894.gif  при http://www.prostoev.net/lections_gif/Image892.gifhttp://www.prostoev.net/lections_gif/Image887.gif= NT |

Примечание: http://www.prostoev.net/lections_gif/Image843.gif- момент (время) r-го (последнего отказа), r - количество отказов; http://www.prostoev.net/lections_gif/Image896.gif- время j-го отказа.

Рассмотрим пример оценки Tн.

***Пример.*** В результате наблюдений за эксплуатацией неремонтируемых однотипных устройств зафиксированы 12 отказов. После двенадцатого отказа наблюдения прекращаются. Значения наработки до отказа (в часах): 58, 110, 117, 198, 387, 570, 610, 720, 798, 820, 840, 921.

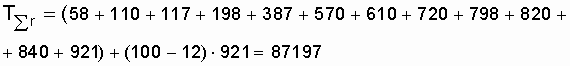
Оценить среднюю наработку до отказа заданного типа устройства, предполагая экспоненциальный закон распределения времени наработки до отказа.

Решение.

Из условия задачи следует, что наблюдения организованы по плану (N, U, r); N=100, http://www.prostoev.net/lections_gif/Image897.gif= 921 ч. В табл. 3 по указанному плану находим суммарную наработку всех устройств:

http://www.prostoev.net/lections_gif/Image898.gif;

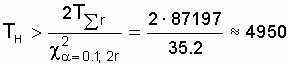
http://www.prostoev.net/lections_gif/Image899.gif;



Точечная оценка средней наработки до отказа

http://www.prostoev.net/lections_gif/Image901.gifч.

Зададимся доверительной вероятностью , тогда . Ограничимся односторонней оценкой (Tн). Нижнюю доверительную границу Tн при  определим по выражению (4) и по справочным таблицам:

ч.

Можно с 90%-й уверенностью утверждать, что истинное значение средней наработки до отказа не ниже 4950 ч, и по этой оценке можно определять и другие показатели надежности, например http://www.prostoev.net/lections_gif/Image903.gif.

**Лекция №7**

**Тема:** Общие сведения о техническом диагностировании

Вопросы:

1 Назначение систем технического диагностирования и основные понятия

2. Структура системы технического диагностирования

3 Достоверность контроля технического состояния

**Вопрос №1**

*Техническое диагностирование* – процесс определения технического состояния изделия с определённой точностью. Целью технического диагностирования является поддержание установленного уровня надёжности.

Процесс диагностирования существенно зависит от характеристик аппаратуры и от того, кем он осуществляется – оператором или автоматически. Чем более полное преставление нужно иметь о состоянии аппаратуры и чем она сложнее, тем больше параметров следует проверять и более сложные приборы использовать.

При наступлении отказа диагностирование предполагает обнаружение факта отказа и его локализацию, т.е. выполнение поиска и установление того элемента (блока, устройства), в котором произошёл отказ, и выявление характера отказа. Локализация отказа должна быть проведена с детальностью, которая позволяет установить, что отказал тот элемент, который может быть заменён или подстроен как в процессе технического обслуживания (ТО), так и при ремонте (т.е. до так называемого *типового элемента замены (ТЭЗ)*).

Перед рассмотрением проблем диагностики, введём ряд понятий и определений.

*Техническое состояние* – совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемая в определённый момент признаками, установленными технической документацией (ТД).

*Вид технического состояния* – это совокупность технических состояний, удовлетворяющих (или не удовлетворяющих) требованиям, определяющим исправность, работоспособность (правильность функционирования) или предельность.

Определение вида технического состояния носит название *контроль технического состояния*.

*Контролем* называется процесс установления соответствия между состоянием объекта и заранее заданной нормой путём восприятия контролируемых параметров, сопоставления их с уставками (границами допусков), формирования и выдачи суждений о результате.

*Система технического диагностирования* (СТД) – совокупность средств и объектов диагностирования и исполнителей (при необходимости), подготовленных к диагностированию и осуществляющая его по правилам, установленным ТД.

*Техническое диагностирование* реализуется путём измерения количественных значений параметров, анализа и обработки результатов измерений и управления объектом в соответствии с алгоритмом диагностирования.

Классификация СТД проводится по ряду признаков, определяющих назначение, задачи, структуру и состав технических средств.

По степени охвата СТД могут быть *локальными и общими*. Под *локальными* понимают СТД, решающие одну из задач – определение работоспособности или поиск места отказа. *Общими* считаются СТД, решающие множество задач: определяют работоспособность, место и причину отказа, выдают рекомендации по устранению отказов, прогнозируют состояние и т.д.

По характеру взаимодействия объекта диагностирования со средствами технического диагностирования СТД подразделяют:

* на системы с *функциональным диагнозом*, в которых решение задачи диагностирования осуществляется в процессе функционирования объекта диагностирования по своему назначению;
* *тестовым диагнозом,* в которых задачи диагностирования решаются в специальном режиме работы объекта путём подачи на него тестовых сигналов.

По используемым средствам СТД бывают:

* с универсальными средствами диагностирования (например, ЭВМ);
* *со специализированными средствами* (стенды, имитаторы и т.д.);
* *с внешними средствами*, в которых средства диагностирования и объект конструктивно отделены друг от друга;

- *с встроенными средствами*, в которых средства диагностирования и объект конструктивно представляют одно изделие.

По степени автоматизации СТД подразделяют на:

* *автоматические*, в которых процесс получения информации о техническом состоянии объекта осуществляется без участия человека (оператора);
* *автоматизированные*, где оператор частично участвует;
* *неавтоматизированные* (ручные), в которых получение и обработка информации осуществляется человеком.

Для осуществления технического диагностирования изделия необходимо: установить показатели и характеристики диагностирования; обеспечить приспособленность изделия к техническому диагностированию; разработать диагностическое обеспечение изделия.

Показатели и характеристики СТД, требования по приспособленности изделий к диагностированию и диагностическому обеспечению должны прорабатываться, начиная с первой стадии жизненного цикла изделия – закладываться в техническое задание, технические условия и документацию.

**Вопрс №2**

Общая структура СТД представлена на рис.1.

Датчики сигналов (ДС) вводят сигналы, параметры которых характеризуют состояние диагностируемой системы. По каналам передачи через коммутатор эта информация транслируется к средству измерения (СИ). Результат измерения или результат его сравнения с полем допусков индицируется (документируется) в виде решения о техническом состоянии.

Устройство управления (УУ) реализует операции управления состоянием изделия и других составляющих СТД. Операции стимулирования осуществляются с помощью генераторов стимулирующих сигналов (ГСС), а устройство прогнозирования (УП) позволяет определить состояние изделия в будущем посредством обработки информации о текущем и прошлом состоянии системы. Показанные на рис. 1 связи могут реализовываться в виде воздействий оператора (ручное или автоматизированное управление), либо с помощью интерфейса, под которым понимают систему сопряжения, включающую как аппаратные, так и программные средства. Применение стандартного интерфейса позволяет реализовать блочно-модульный принцип построения СТД и эта система является частным случаем информационно-измерительной системы в современном понимании (т.е. управляется ЭВМ, агрегатируется и т.д.).

В результате процесса диагностирования и контроля выносится решение о виде технического состояния: работоспособно или неработоспособно диагностируемое устройство. Работоспособное состояние определяет возможность использования изделия по своему прямому функциональному назначению. Возможная ошибка диагностирования и его правильность зависят от ряда событий, которые по своей физической природе являются случайными. Следовательно, количественные характеристики показателей диагностирования должны быть представлены вероятностями состояний объекта и средств диагностирования и вероятностями принятия решений о техническом состоянии.

ГСС

ГСС

ОТД

ДС

ДС

КП

КП

К

СИ

ИНД.

ДУ(ЗУ)

УУ

У Пр.

ДИСКР

П Доп.

Рис. 1 - Структура системы технического диагностирования.

*Обозначения:* ГСС – генератор стимулирующих сигналов; ОТД – объект технического диагностирования; ДС – датчики сигналов; КП – канал передачи сигналов; К – коммутатор; СИ – средства измерений; ИНД. – индикатор; УУ – устройство управления; ДИСКР. – дискриминатор ( устройство сравнения ); ДУ(ЗУ) – документирующее или запоминающее устройство; П Доп. – поле допуска; Упр. – устройство прогнозирования.

На количественное значение этих вероятностей оказывают влияние все элементы СТД. Ошибки диагностирования могут быть вызваны в основном такими факторами:

* неработоспособностью средств диагностирования;
* большой погрешностью средств измерений в процессе диагностирования, погрешностями преобразования измерительной информации;
* аддитивными и мультипликативными помехами, возникающими в самом объекте, шумами в каналах передачи и цепях коммутации;
* выбором допусков на диапазон изменения диагностируемых параметров и погрешности сравнения;
* ошибками при принятии решений, состоянием оператора, если система не автоматическая;
* быстродействием системы;
* ошибками, возникающими при формировании стимулирующих сигналов.

В связи с многофункциональностью СТД большое значение для практики имеет оптимизация её на основе определённых критериев, для чего необходимо аналитическое описание системы.

**Вопрос №3**

Как известно, суждение об исправности выносится на основании обработки информации, полученной путём измерения контролируемых параметров РЭО. Поскольку любому процессу измерения неизбежно присущи погрешности, при приятии решения о техническом состоянии РЭО неизбежны ошибки, существо которых иллюстрирует рис. 2.

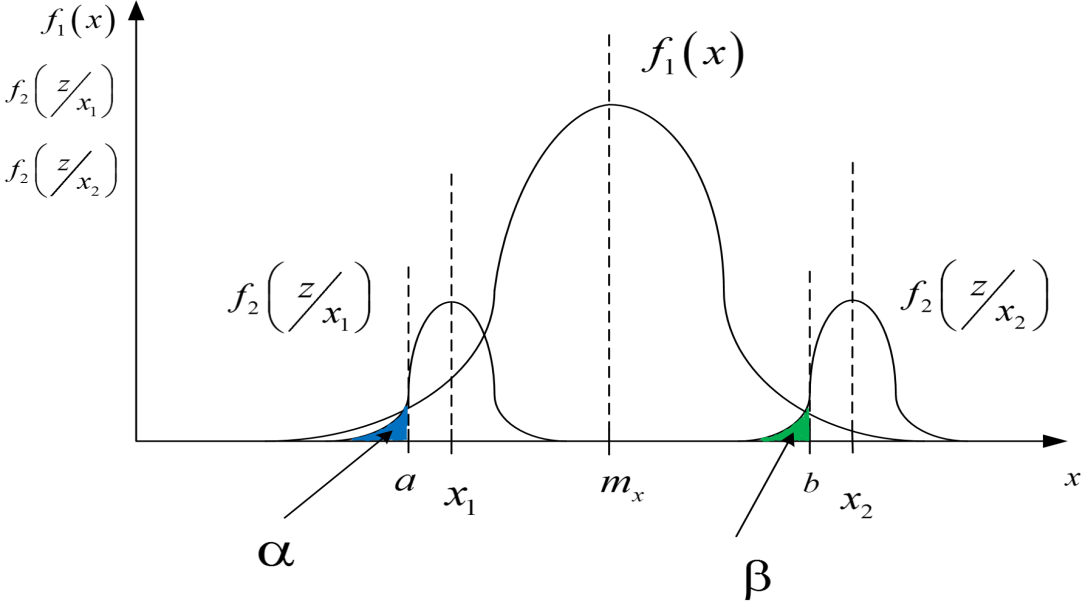


Рис. 2 Вероятности ошибок первого и второго рода

Вследствие стохастической природы контролируемых параметров они описываются законом распределения с некоторой плотностью вероятности f1(ξ). Условие исправного состояния РЭС по некоторому параметру заключается в нахождении контролируемого параметра в границах установленных допусков **а** и **b**:

 (1)

Если измерения проводятся прибором, погрешности которого описываются законом распределения с плотностью вероятности f2(t), то вместо истинного значения контролируемого параметра ξ воспринимается его значение с ошибкой t. Считая случайные величины ξ и t независимыми, условие, на основании которого выносится суждение о нахождении контролируемого параметра относительно поля допуска, записывается в виде

. (2)

Разница между истинным условием исправности объекта контроля (1) и фактически проверенным условием (2), является объяснением причин возникновения ошибок при вынесении заключения о техническом состоянии в процессе контроля (Рис. 2). Действительно, если контролируемый параметр принимает некоторое значение ξ1 или ξ2, то возможные результаты измерения распределяются вокруг этого значения в соответствии со случайным законом распределения погрешностей измерительного прибора. На рис. 2 показаны кривые  условных плотностей распределения погрешностей измерительного прибора при условии, что значения контролируемого параметра равны ξ1 или ξ2 соответственно.

В табл. 1 приведены четыре взаимоисключающих события, возможные при оценке результатов контроля по данным измерительного тракта системы контроля

Как следует из приведенной таблицы 1, события 1 и 2 соответствуют правильному заключению о техническом состоянии РЭС, при реализации 3 и 4 событий совершаются ошибки в определении технического состояния. При этом реализация события 3 приводит к такого рода ошибкам, когда фактически исправное оборудование признаётся неисправным. Такие ошибки называют *ошибками первого рода,* они характеризуют риск изготовителя и обозначаются индексом α.

Таблица 1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Событие и его вероятность | Результаты измерения | Истинное значение параметра |
| 1. | Результат измерения в пределах допуска: . | Значение параметра в пределах допуска: . |
| 2. | Результат измерения вне пределов допуска: . | Значение параметра вне пределов допуска: |
| 3. | Результат измерения вне пределов допуска: . | Значение параметра в пределах допуска: . |
| 4. | Результат измерения в пределах допуска: . | Значение параметра вне пределов допуска: |

На рис. 2 условная вероятность их появления соответствует заштрихованной части под кривой распределения .

При реализации события 4 фактически неисправное оборудование признаётся исправным. Такие ошибки, характеризуемые риск заказчика, называются *ошибками второго рода* и обозначаются индексом β. Условная вероятность их появления β на рис. 2.2 соответствует заштрихованной части под кривой  . Обозначив суммарную вероятность события 1 и 2 через Р0 и учитывая, что приведенные в таблице 2.1 исходы представляют собой полную группу несовместных событий, получим

 (3)

откуда

 (4)

При построении системы эксплуатации необходимо учитывать наличие ошибок первого и второго рода. При эксплуатации РЭО ошибки первого рода вынуждают проводить ненужные дополнительные контрольно–регулировочные работы. Наличие ошибок второго рода может привести к такому положению, когда для выполнения оперативных задач может быть допущено фактически неисправная РЭС. Наличие ошибок второго рода может привести к большим потерям.

Таким образом, наличие погрешностей контрольно-измерительных трактов в системе контроля может привести к ошибкам в определении технического состояния РЭС. В свою очередь, ошибочные заключения в определении технического состояния оборудования являются причиной дополнительных материальных затрат при эксплуатации. При этом следует учитывать неравноценность потерь, вызываемых ошибками первого и второго рода. При эксплуатации РЭС допуск неисправных объектов к выполнению оперативных задач может привести к существенно большим потерям, чем потери, вызванные ошибками первого рода. Поэтому на практике применяются различные показатели достоверности контроля. В дополнение к приведенному выражению (2.4) для достоверности контроля Р0, которое называют также *достоверностью разбраковки,* применяют следующие показатели достоверности:

* достоверность определения *исправного состояния* РЭС, которая представляет собой апостериорную вероятность исправного состояния объекта, признанного исправным по результатам контроля

 (5)

где  - вероятность нахождения объекта в исправном состоянии (см. таблицу 1);

- достоверность определения *неисправного состояния*РЭС, которая представляет собой апостериорную вероятность нахождения объекта в неисправном состоянии, признанного неисправным по результатам контроля

 (6)

где  - вероятность нахождения объекта в неисправном состоянии.

Таким образом, достоверность контроля зависит от точности контрольно-измерительных трактов применяемой системы контроля. Числовые параметры достоверности контроля и точности измерительного тракта системы контроля связаны между собой аналитическими зависимостями. Как следует из рис. 2.2, события, при которых возможны ошибки второго рода, реализуются при совместном появлении двух событий:

 (7)

Следовательно, имеет место неравенство

 (8)

или

. (9)

При известном законе распределения погрешности измерительного тракта системы контрjля f2(t) вероятность нахождения случайной величины t в интервале (9) равна

 . (10)

Предполагая независимость погрешности измерений от измеряемой величины, выражения для вероятностей ошибок соответственно второго и первого рода при некотором значении контролируемого параметра ξ определяются следующим образом:

 (11)

 (12)

Из выражений (11) и (12) следует, что расширение поля допуска увеличивает ошибки второго рода и уменьшает ошибки первого рода, а повышение точности измерения, влияющей на значения  через плотность распределения , приводит к одновременному уменьшению ошибок первого и второго рода.

Физической основой возникновения ошибок первого и второго рода служат погрешности контрольно-измерительных трактов систем контроля. Следовательно, уровень этих погрешностей должен выбираться с учётом требуемой достоверности.

Зная закон распределения контролируемого параметра  и закон распределения погрешности измерения , на основе выражений (11), (12) можно решать два типа задач:

* определять необходимую точность измерительного тракта системы контроля, исходя из заданной достоверности контроля;
* определять допуски на контролируемые параметры, исходя из заданной достоверности контроля.

Следует отметить, что непосредственное использование выражений (11), (12) затруднительно, так как в наиболее важных для практики случаях эти интегралы не выражаются через элементарные функции. Поэтому при практических расчётах используют графики, построенные на основе выражений (11),(12) с применением численных методов интегрирования.

**Лекция №8**

Тема: Оптимизация процесса поиска отказов

1. Модели процессов изменения состояния объектов диагностирования.
2. Прогнозирование технического состояния.
3. Оптимизация алгоритма поиска места отказа.

**1. Модели процессов изменения состояния объектов**

**диагностирования**

В процессе работы система постоянно переходит из одного состояния в другое : исправное, работоспособное, неисправное и т.д. Переход из одного состояния в другое является процессом случайным. Марковский процесс является близкой к реальности и удобной моделью такого процесса, позволяющей связать вероятностные характеристики переходов с параметрами объекта диагностирования. Как известно, марковский процесс обладает следующим свойством: состояние процесса не зависит от его предыстории, т.е. для любого момента t-t0 вероятность любого состояния системы P(Si) зависит только от её состояния в настоящий момент и не зависит от того, когда и каким образом система оказалась в этом состоянии.Для моделирования марковские процессы можно иллюстрировать с помощью графа состояний, где дугами обозначены возможные переходы.

Марковский процесс с дискретными состояниями и дискретным временем называют марковской цепью. Наиболее удобной моделью описания системы как объекта диагностирования является марковский случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем, который называют напрерывной цепью Маркова.

Характеристиками вероятностей перехода системы из состояния Si в Sj является плотность вероятностей перехода λij, которая может быть постоянной во времени, т.е. λij=const (в этом случае процесс называется однородным) или λij=var.

Случайный процесс изменения состояния объекта диагностирования удобно представить как переход из состояния в состояние, осуществляющийся под действием потока событий. Тогда плотность вероятностей переходов получает смысл интенсивностей λij , а процесс будет марковским, если эти потоки пуассоновские (те. Ординарные, без последействия и с постоянной интенсивностью).

Поток верятностей перехода из состояния Si в SJ – это величина λIJ PI(t). Для любого t справедливо выражение , т.е. система должна находиться в одном из n конечных состояний. Нахождение вероятностей PI(t) осуществляется путём решения системы дифференциальных уравнений вида .

Система уравнений составляется при помощи ориентированного графа по следующему правилу: производная вероятности каждого состояния равна сумме всех потоков вероятности, идущих из другого состояния в данное, минус сумма всех потоков вероятности, идущих из данного состояния в другие. Такая система носит название уравнений Колмогорова – Чепмена и решается любым подходящим методом решений дифференциальных уравнений.

**2. Прогнозирование технического состояния**

Прогнозирование состояния изделия означает предсказание его будущего состояния на основе изучения и учёта тех факторов, от которых оно зависит и которые ему соответствуют. Количественный прогноз состояния объекта в силу случайного характера протекающих в нём процессов и условий работы всегда подчиняется только случайным закономерностям. Но прогнозирующие оценки всегда имеют всегда имеют детерминированную и случайную составляющие, что и определяет совокупность ДП в будущем: ,

где Тпр. – интервал прогнозирования.

Для практики результаты прогнозирования позволяют:

1. Определять периодичность проведения диагностирования.
2. Находить оптимальную частную совокупность диагностических параметров для различных периодов диагностирования.
3. Определять объём неснижаемых запасов запасных частей (блоков, узлов, ЗИП).
4. Корректировать (оптимизировать) алгоритм поиска места отказа, например, по критерию “время-безотказность”.
5. Сократить время проведения различного типа испытаний сожных систем.
6. Определять влияние различных факторов и словий работы объекта, а также деградационных процессов.
7. Совершенствовать стратегии ТО.

В общем виде алгоритм прогнозирования технического состояния состоит из следующей последовательности операций:

* вначале определяют прошлое состояние объекта S(t- Tан.), где Тан. – интервал анализа;
* затем определяют предыдущее состояние S(t-Tнаб.) за определённый интервал Тнаб.<< Тан.;
* далее проводят техническое диагностирование и контроль S(t) в данный момент времени t0;
* получив перечисленные данные, проводят обработку результатов по данным S(t-Tан.), S(t-Tнаб.), S(t0) для определения закономерности изменения состояния объекта;
* после этого проводят прогнозирующий расчёт и определение состояния S(t+Tпр.) на прогнозируемом временном интервале.

Отметим, что при прогнозировании обязательным условием является определение вида технического состояния, т.е. контроль, поэтому прогнозирование обычно называют прогнозирующим контролем.

Операции прогнозирования можно разделить на две большие группы: операции интерполяции по обработке известных данных и операции экстраполяции по определению будущих траекторий изменения процессов, т.е. собственно прогноз.

Результаты прогнозирования представляют либо в той же размерности, что и ДП, т.е. целью прогнозирования является вычисление контролепригодного параметра в будущем (аналитическое прогнозирование см. Рис.4), либо в виде определения вероятности выхода (невыхода) характеристик диагностируемого параметра за границы допуска в определённый временной интервал (вероятностное прогнозирование см. Рис.5). Оба принципа следует отнести к математическому прогнозированию, так как в обоих случаях результат прогноза получается на базе математической обработки результатов диагностики и контроля.

Помимо рассмотренных принципов на практике встречаются методы аппаратурного прогнозирования.

t0 t1 t2 ti tn tn+m

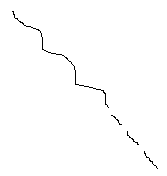
## U(t)

U(tn)

U(t1)

Uдоп.

t



Т1 Т2=Тпр.

Рис.1. Аналитическое прогнозирование.

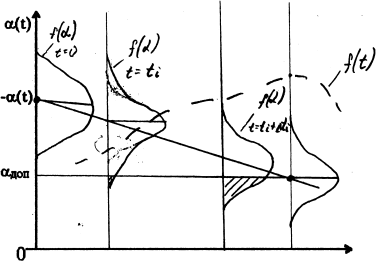
t

Рис.2. Вероятностное прогнозирование.

Аналитическое прогнозирование реализуется следующим образом: параметр, характеризующий техническое состояние объекта, меняется во времени, причём это изменение описывается монотонной функцией (Рис.4). Значение параметра U(t) известно на временном интервале Т1. В результате прогноза по известным значениям U(t1)...U(tn) необходимо найти значения U(tn+1)...U(tn+m) и определить временной интервал работоспособного состояния изделия в будущем Тпр. Решение этой задачи может базироваться на одном из методов численного анализа: функцию U(t) заменяют функцией A(t) таким образом, что на интервале Т1 выполняются условия U(t1)=A(t1), U(t2)=A(t2)....U(tn-1)=A(tn-1), а на интервале Т2=Тпр.

U(tn) – A(tn)<ε0, U(tn+1) – A(tn+1)<ε1,.... U(tn+m) – A(tn+m)<εM,

Где U(tn+1)....U(tn+m) – неизвестные значения функции, а εi – наперёд заданные положительные числа.

Функция A(t) чаще всего должна представлять собой алгебраический многочлен. При аналитическом прогнозировании используются прежде всего методы численного анализа – такие как аппарат рядов и приближённых функций.

В процессе анализа решаются задачи:

1. интерполирования – нахождение значений функции U(t) для промежуточных значений аргумента  где  При это мы оперируем функцией A(t), которая называется интерполирующей и отыскивается в виде алгебраического многочлена.
2. экстраполирования, заключаящаяся в определении значений функции U(t) в области Т2 = ТПР., т.е. вне области известных значений аргумента. При этом многочлен A(t) степени n, удовлетворяющий условию A(ti) = U(ti), должен удовлетворять и неравенству

.

Многочлен этот называют экстраполяционным. Он может быть получен путём преобразования интерполяционного многочлена.

Вероятностные методы прогозирования базируются на исподьзовании математического аппарата теории случайных функций. Основной реультат вероятностного погнозирования – определение вероятности сохранения работоспособного состояния или наступление неработоспособного состояния – отказа. Если плотность распределения вероятностей функции U(t) будет Wt(U), то искомая вероятность выхода U(t) ниже предела Uдоп. Определяется формулой



Если для контролируемого параметра U(t) функция Wt (U) известна, то можно определить вероятность попадания значения функции в любой заданный интервал оси U, что иллюстрируется Рис.5.Заштрихованные площади численно равны вероятности выхода параметра U(t) а допустимый предел Uдоп. Если Wt (U) имеетнормальное распределение, то задача прогнозирования упрощается: необходимо прогнозировать только изменение среднего  и среднеквадратиеского значения σt(U).

1. **Оптимизация алгоритма поиска места отказа**

Поиск места отказа производится после установления факта неработоспособного состояния. Собственно поиск места отказа это нахождение той части изделия, которая привела к возникновению состояния неработоспособности. Физически отказ это прекращение функционирования (явный отказ) или выход параметра за пределы допуска (неявный отказ).

Рассмотрим наиболее распространённые способы построения алгоритмов поиска неисправностей.

**3.1.Программа поиска неисправностей, построенная по критерию «Время – безотказность» («Время – вероятность»)**

Если известны вероятности отказов Pi(0) всех диагностируемых блоков РЭО, а также среднее время диагностирования каждого блока в процессе поиска места отказа (ПМО) - τдi, то математическое ожидание времени поиска места отказа для произвольной последовательности проверок имеет вид:

.

Если изменить программу проверок, переставив, например, местами первую и вторую, то

.

.

Если , то первая программа эффективнее второй, т.е. . Отсюда получают принцип ранжировки проверок при ПМО: для каждого блока находят отношение  и строят алгоритм по принципу a1> a2 > a3 >....>an, т.е. сначала проверяют тот блок, у которого выше вероятность отказа и меньше время поиска, т.е. их отношение максимально. При реализации этого алгоритма среднее время диагностирования оказывается минимальным.

Для примера рассмотрим ОД, состоящий из 8 блоков со значениями вероятностей безотказной работы блоков соответственно равными 0,85; 0,65; 0,7; 0.9; 0,9; 0,8; 0,75; 0,8 и временами поиска неисправностей [мин] в блоках соответственно 1,2; 2,0; 1,1; 2,5; 3,2; 1,4; 4,0; 2,1; 3,1; 1,7.

1.Для реализации программы поиска неисправностей находят отношения ai : 

2.Строят алгоритм по принципу 

1. Вычисляют среднее время контроля параметров:



**3.2.Метод половинных разбиений**

Широко используется при наличии поседовательной или близкой к ней структуре. В функциональной модели находят среднюю точку , проверяют состояние объекта в этой точке и в зависимости от результата проверяют павую или левую части.

**3.3. Вариант диагностирования на основе информационного**

**критерия**

В процессе определения технического состояния объекта РЭО производится техническое диагностирование. При этом под техническим состоянием понимают всю совокупность изменяющихся в процессе эксплуатации свойств объекта, перечень которых устанавливается технической документацией на этот объект.

Система диагностирования является неотъемлемой частью системы контроля, определяющей вид технического состояния. Результатом диагностирования является локализация места отказа или неисправности, определение его вида и причины возникновения.

Заключение системы технического диагностирования является результатом работы целого ряда устройств в условиях воздействия, как правило, помех и шумов, что приводит к возникновению ошибок в её решениях.

Основная задача диагностического контроля заключается в определении отказавшего элемента. В качестве элементов можно принимать различные структурные части РЭО (тракты, блоки, детали). Это зависит от формы проведения регламентных работ, времени, отпущенного на поиск, обнаружение и устранение отказов, конструктивных особенностей РЭО.



Глубина диагностирования - до уровня функциональных узлов . С учётом контрольных точек в ОД составим модель РЭО (Рис.3). На рисунке обозначены: Б1 -задающий генератор; Б2 - буферный усилитель; Б3 - усилитель мощности; Б4 - блок электропитания. Параметры Х1, Х2, Х3, Х4 характеризуют работоспособность элементов ОД.

Из известных методов диагностирования выберем один вариант диагностирования на основе информационного критерия. Следуя данному критерию, для определения очерёдности контроля параметров Х1…Х4 необходимо вычислить функцию предпочтения W на каждом шаге контроля. Для этого составим таблицу (матрицу) состояний ОД. Правило заполнения таблицы состояний заключается в следующем. Если параметр Хi i-го элемента модели находится вне поля допусков (или отсутствует), т.е. модель объекта диагностики находится в состоянии Si, тогда на пересечении Хi-й строки и S-го столбца записывается 0 (нуль). Выходные параметры остальных элементов в зависимости от их функциональных связей с отказавшим элементом могут находиться в пределах допуска и обозначаться “1”(единицей) или вне допусков (отсутствовать) - обозначаться “0”(нулём). В нашем случае ОД характеризуется следующими состояниями: S1- отказ элемента 1; S2- отказ элемента 2; S3- отказ элемента 3; S4- отказ элемента 4; тогда таблица состояний примет вид, показанный на рисунке 4. С учётом исходной таблицы (рис.4) функция предпочтения W на каждом очередном шаге контроля рассчитывается по формуле: W = min ⎢∑0-∑1⎜, где ∑0 и ∑1 - количество 0 и 1 в строке таблицы. Первоначально выбирается строка исходной таблицы (рисунок 4) с минимальным модулем разности числа нулей и единиц. Если таких строк окажется больше одной, то выбор производится произвольно. Для строки Х1 исходной таблицы функция W1=0, для строк Х2 и Х4 W2,4=3, а для Х3 W3=4. Поэтому первым для контроля выбираем параметр Х1. Результат контроля значения Х1 - бинарный : параметр Х1 может быть в допуске(1) или вне допуска(0). В этом случае таблица состояний раскладывается на две ветви (рисунок 4).



Если значения Х1 - в допуске (1), то количество возможных состояний ОД сокращается до двух (S2 и S3), так как элементы Б1 и Б4 модели в этом случае исправны. По данным таблицы состояния ОД для этой ветви очевидно, что условию W = min ⎢∑0-∑1⎜ соответствует её первая строка. Поэтому следующим параметром для контроля выбирается Х2. Если после контроля параметр Х2 находится в допуске, то отказал элемент Б3 (состояние S3), если Х2 - вне допуска, то отказал элемент Б2 (состояние S2). Если же после первого шага контроля параметр Х1 - вне допуска (0), то возможные состояния ОД также сокращается до двух - S1 или S4. В таблице этой ветви для контроля выбираем параметр Х4, так как после контроля Х4 определяет отказавший элемент. При Х4=1 отказавшим элементом ОД является Б1, а при Х4=0 - элемент Б4.

Программа поиска отказавшего элемента приведена на рисунке 5. Для контроля правильности составления программы диагностирования необходимо реализовать все ветви контрольных операций, которые должны заканчиваться принятием решений об отказавшем элементе ОД (обозначены на программе кружочками). Количество кружочков должно быть равно количеству элементов модели ОД.



Произведём расчёт эффективности программы поиска отказавшего элемента ОД. В соответствии с программой, приведённой на рисунке 5., составляется граф состояний ОД.

Известно, что граф состояний ОД должен содержать весь набор технологических операций, необходимых для восстановления объекта, т.е. все операции контроля параметров, операции замены отказавшего элемента и выходного контроля работоспособности восстановленного ОД. При отсутствии ошибок контроля, очевидно, граф состояний ОД будет включать один набор технологических операций, заканчивающийся операциями замены отказавшего элемента и выходного контроля ОД. При наличии ошибок классификации параметров ОД при отказе любого элемента граф состояний ОД включает все ветви программы диагностирования. В этом случае из всех возможных НТО только один соответствует безошибочному определению отказавшего элемента, остальные НТО приводят к непроизводительным затратам из-за вынужденного проведения замены исправных элементов вследствие ошибок контроля.

Граф технического состояния ОД составляют, предполагая, что поочерёдно отказывают все его блоки. Таким образом, для оценки эффективности программы поиска составляют столько графов технического состояния ОД, сколько имеется элементов в диагностической модели.

Поочерёдно составим графы НТО восстановления РЭО при отказе элементов модели ОД. При условии α=β=0 графы НТО примут вид, показанный на рисунках 6÷9.

Диагностика .tif

Поясним порядок составления графа НТО на примере состояния S1, когда отказал элемент Б1 ОД (рисунок 6). В соответствии с программой поиска (рис.5) выполняется первая технологическая операция - контроль параметра Х1. Поскольку ОД находится в состоянии S1 и ошибки контроля отсутствуют, то параметр Х1 примет значение Х1=0. Следуя программе рис.5., выполняют вторую технологическую операцию - контроль параметра Х4. При этом параметр Х4 примет значение Х4=1. Из программы (рис.5.) следует, что в ОД отказал элемент Б1. Поэтому далее выполняют операцию замены элемента Б1 и затем операцию контроля всего ОД. После выходного контроля ОД признаётся исправным. Таким образом, время, затраченное на восстановление ОД, находящегося в состоянии S1, будет равно сумме времён проведения каждой отдельной технологической операции (рис.6): t(НТО/Б1)=tкХ1+tкХ4+tзБ1+tкОД

Подобным образом составляют графы НТО для состояний S2,S3 и S4 (рис.7 ÷ 9) и рассчитываются значения:

t(НТО/Б2)=tкХ1+tкХ2+tзБ2+tкОД;

t(НТО/Б3)=tкХ1+tкХ2+tзБ3+tкОД;

t(НТО/Б4)=tкХ1+tкХ4+tзБ4+tкОД.

Математическое ожидание временных затрат на восстановление работоспособности ОД будет равно:

m1(t)=t(НТО/Б1)QБ1+ t(НТО/Б2)QБ2+ t(НТО/Б3)QБ3+ t(НТО/Б4)QБ4.